

DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR DE UN *CUBESAT* DE BAJO COSTO

YEFFERSON STIVEN BOHORQUEZ GARZÓN



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ, D. C.

2018

DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR DE UN *CUBESAT* DE BAJO COSTO

YEFFERSON STIVEN BOHORQUEZ GARZÓN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERO AERONÁUTICO

Director: MSc JAIME ENRIQUE ORDUY RODRÍGUEZ

Codirector: MSc. IVÁN FELIPE RODRÍGUEZ BARÓN

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

BOGOTÁ, D. C.

Nota de aceptación



Firma del presidente del jurado

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. Agosto de 2018



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de La
Fundación Universitaria

Los Libertadores, los jurados
calificadores y el cuerpo docente
no son responsables por los
criterios e ideas expuestas en el
presente documento. Estos
corresponden únicamente a los autores



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

A mi Padre.

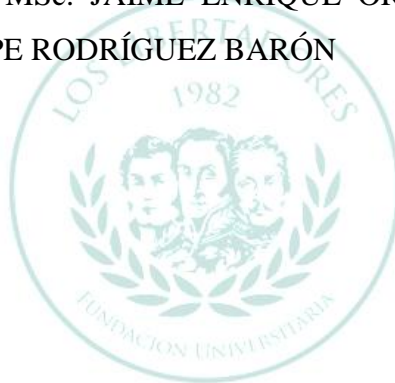
AGRADECIMIENTOS

Dios, Tú en los días más difíciles me has dado la fuerza y la razón para seguir adelante.

A mi Familia, principal forjadora de mi carrera.

A mis amigos y todas las personas quienes me alentaron para la realización de este trabajo de grado.

A mi director de proyecto. MSc. JAIME ENRIQUE ORDUY RODRÍGUEZ, y a mi codirector MSc. IVÁN FELIPE RODRÍGUEZ BARÓN



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Réplica del Sputnik 1	2
Imagen 2. Elementos de una misión espacial.....	9
Imagen 3. Misiones espaciales	11
Imagen 4. Prototipo de lanzadera para <i>CubeSat</i>	12
Imagen 5. Proyecto OPAL	13
Imagen 6. Satélite meteorológico JPSS-1	14
Imagen 7. <i>CubeSat</i> 1U	19
Imagen 8. Comparación de <i>CubeSat</i> por tamaño	20
Imagen 9. Garatea-L.....	21
Imagen 10. Libertad 1	22
Imagen 11. <i>CubeSat</i> MOVE-II	28
Imagen 12. Bus de datos [cumplimiento a RT015].....	35
Imagen 13. Arduino Nano.....	36
Imagen 14. Montaje en baquelita Arduino Nano y conector de carga de baterías.....	37
Imagen 15. Baterías.....	38
Imagen 16. Panel solar, CN3065 y borneras [cumplimiento a RT014]	38
Imagen 17. Subsistema de comunicaciones	39
Imagen 18. Montaje de los sensores	40
Imagen 19. Estructura del <i>CubeSat</i> [cumplimiento a RT020]	41
Imagen 20. Perfiles de aluminio en L	41
Imagen 21. Tornillos hexagonales de 3/16 x 1/2	42
Imagen 22. Postes de sujeción de placas electrónicas	43
Imagen 23. Sujeción de las placas con la estructura	43
Imagen 24. Ensamble del <i>CubeSat</i>	44
Imagen 25. Ensamble del <i>CubeSat</i>	45
Imagen 26. Peso total del <i>CubeSat</i>	45
Imagen 27. Administrador de dispositivos Modulo 3DR en puerto serial COM.....	47
Imagen 28. Recepción de datos por puerto serial COM3	51

Imagen 29. Recepción de datos por la interfaz de MATLAB.....	52
Imagen 30. Graficas de los datos obtenidos en MATLAB	53
Imagen 31. Interfaz del acelerómetro.....	54
Imagen 32. Interfaz acelerómetro 2	55



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de satélites	14
Tabla 2. Fases del diseño Preliminar.....	27
Tabla 3. Pines Utilizados.....	36
Tabla 4. Consumo de corriente de los dispositivos.....	46
Tabla 5. Equipos, materiales y costos	58
Tabla 6. Costo total del proyecto	58
Tabla 7. Comparación con el Libertad 1	60
Tabla 8. Requerimientos	77
Tabla 9. Cumplimientos y Especificaciones	78



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1. Subsistemas de un satélite	15
Diagrama 2. Diagrama en V Spacecraft System Engineering	25
Diagrama 3. Diagrama del <i>CubeSat</i>	33
Diagrama 4. Diagrama plataforma y carga útil.....	34
Diagrama 5. Circuito eléctrico de conexiones y componentes.	49
Diagrama 6. Arquitectura física	56
Diagrama 7. Arquitectura funcional.....	57



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

SIGLAS

AAU *CubeSat de la Aalborg Universit*

ADC Conversor análogo digital

AESP-14 Aeroespacial 14

CCE Comisión Colombiana del Espacio

CDS *CubeSat Design Specification*

COTS *Commercial off the shelf*

CPU Unidad central de procesamiento

DARPA *Defense Advanced Research Projects Agency*

DTU *Technical University of Denmark*

ELF *Extremely low frequency*

ESA *European Space Agency*

FAC Fuerza Aérea Colombiana

GND *Ground / Tierra electrónica*

GPS *Global Positioning System*

GNSS *Global Navigation Satellite System*

IDE Integrated Development Environment

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

INPE *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

ITA Instituto Tecnológico de Aeronáutica

mAh Miliamperios hora

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

ONU Organización de las Naciones Unidas

P-POD *Poly Picosatellite Orbital Deployer*

URSS Unión de las Repúblicas Socialistas y Soviéticas

UTIAS *University of Toronto Institute for Aerospace Studies*

VAC Voltaje alterno

VDC Voltaje directo

XCTU *XBee Configuration and Test Utility*

GLOSARIO

ACTITUD: postura o posición de un cuerpo con referencia a 3 ejes de dirección (X, Y, Z)

AEROESPACIAL: de la aviación y de la astronáutica o relacionado con ellas;

ASTROBIOLOGÍA: ciencia que estudia la vida en los astros;

AUTÓNOMA: capacidad máxima de una máquina, para funcionar sin necesidad de reponer combustible o recargar baterías;

CODIFICAR: expresar una información en el lenguaje simbólico de la computadora;

CÓDIGO BINARIO: es un método de representación mediante números que usa sólo los dígitos 1 y 0;

COLOCACIÓN: manera de estar colocadas personas o cosas en el espacio;

COMPETENCIA: capacidad para el desarrollo de algo;

CONSTELACIÓN: conjunto de satélites que trabajan en grupo en una órbita determinada;

COSMOS: espacio exterior a la Tierra;

CUBESAT: es un estándar de diseño de nanosatélites, cuya estructura es escalable en cubos de 10 cm de arista y masa inferior a 1,33 kg;

DESPLIEGUE: desdoblar o extender lo que está plegado, ejemplo: despliegue de paneles solares

DIGITALIZAR: convertir en números una magnitud física;

ENTRADA ANÁLOGA: es aquella en la que los valores de la tensión o voltaje varían constantemente y pueden tomar cualquier valor;

ESTACION TERRENA: estación de radio terrestre para la retransmisión de distintos servicios de televisión, voz y datos vía satélite;

FENÓMENOS: cambios que se presentan en la materia sin alterar su constitución, es decir, que no forman nuevas sustancias y, por lo tanto, no pierden sus propiedades, solamente cambian de forma o de estado de agregación; por ejemplo, el paso de la corriente eléctrica por un alambre, el estiramiento de una liga, la solidificación o evaporación del agua, entre otros;

FUENTE DE ALIMENTACIÓN: dispositivo electrónico que suministra un voltaje constante que lo mantiene encendido;

GEOFÍSICO: parte de la geología que estudia la física terrestre;

GRAVITATORIO: perteneciente o relativo a la gravitación;

HARDWARE: conjunto de aparatos que conforman un sistema;

IONOSFERA: conjunto de capas de la atmósfera que están por encima de los 80 km. Presentan fuerte ionización causada por la radiación solar y afectan de modo importante a la propagación de las ondas radioeléctricas;

LANZAMIENTO: poner un objeto en órbita desde la tierra;

MICROCONTROLADOR: es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria;

MISIÓN: fin por el cual se construye un vehículo espacial;

MULTIDISCIPLINAR: que abarca o afecta a varias disciplinas;

PERFIL: segmento largo de material determinado;

PICOSATÉLITE: satélite cuyo peso esta entre 0.1 y 1 kg;

PLATAFORMA: conjunto de subsistemas de un satélite;

PROTOTIPOS: ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa;

PUERTO SERIAL: interfaz de comunicaciones de datos digitales, frecuentemente utilizado por computadoras y periféricos;

RX/TX: circuito receptor - transmisor

SENSOR: dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, entre otros) u otras alteraciones de su entorno;

SIMULADOR: aparato que reproduce el comportamiento de un sistema en determinadas condiciones, aplicado generalmente para el entrenamiento de quienes deben manejar dicho sistema;

SISTEMAS EMBEBIDOS: dispositivos integrados en productos, que controlan una o varias funciones, con recursos limitados y en condiciones ambientales hostiles;

SOFTWARE: conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora;

SOFTWARE LIBRE: se refiere a la libertad de los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, cambiar y mejorar el software. De modo más preciso, se refiere a la libertad de usar el programa, con cualquier propósito;

TELEMEDICINA: prestación de servicios médicos a distancia;

TELEMETRÍA: conjunto de técnicas para la medida a distancia de magnitudes físicas;

TRANSPONDEDOR: dispositivo utilizado en telecomunicaciones cuyo nombre viene de la fusión de las palabras inglesas Transmitter y Responder (Contestador/Respondedor).



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	5
2.3 ALCANCE	6
2.4 METODOLOGÍA	6
2.5 OBJETIVOS.....	7
2.5.1 Objetivo General.....	7
2.5.2 Objetivos Específicos	7
2.6 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	7
3. MARCO TEÓRICO.....	9
3.1 SISTEMAS ESPACIALES	9
3.2 MISIONES ESPACIALES	10
3.3 SATÉLITES	13
3.4 CLASIFICACIÓN.....	14
3.5 SUBSISTEMAS DE SATÉLITES.....	15
3.5.1 Subsistema de Computador de vuelo.....	16
3.5.2 Subsistema de comunicaciones.....	16
3.5.3 Subsistema de potencia.....	16
3.5.4 Subsistema de control de actitud.	17
3.5.5 Subsistema de control térmico.....	17
3.5.6 Subsistema estructural.	17
3.5.7 Subsistema de propulsión.	17
3.6 CARGA ÚTIL O MÓDULO DE MISIÓN	18
3.7 CUBESAT.....	18
3.8 SATÉLITES UNIVERSITARIOS	20
3.9 LIBERTAD 1	22

3.10 INGENIERÍA DE SISTEMAS	23
3.11 PROCESOS DE DESARROLLO DE SISTEMAS ESPACIALES.....	24
3.12 DISEÑO CONCEPTUAL	26
3.13 DISEÑO PRELIMINAR	27
4. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN <i>CUBESAT</i> DE BAJO COSTO	28
4.1 NECESIDAD	29
4.1.1 Características del proyecto	29
4.2 REQUERIMIENTOS DE LOS SUBSISTEMAS QUE COMPONEN AL <i>CUBESAT</i>	29
4.2.1 Requerimientos funcionales.....	29
4.2.2 Requerimientos técnicos	30
4.2.3 Requerimientos operacionales	31
4.3 PLATAFORMA DEL <i>CUBESAT</i>	31
4.4 SUBSISTEMA DE COMPUTADOR DE VUELO [CPU].....	31
4.5 SUBSISTEMA DE POTENCIA	32
4.6 SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES.....	32
4.7 CARGA ÚTIL.....	32
5. PROCESO DE DESARROLLO DE UN <i>CUBESAT</i> DE BAJO COSTO	34
5.1 CONCEPCIÓN DEL DISEÑO	34
5.2 COMPUTADOR DE VUELO	35
5.3 SUBSISTEMA DE POTENCIA	37
5.4 SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES.....	39
5.5 CARGA ÚTIL.....	40
5.6 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL	41
5.7 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE SUJECCIÓN	42
5.8 CONSUMO DE CORRIENTE DEL <i>CUBESAT</i>	46
5.9 ESTACIÓN TERRENA.....	47
5.9.1 Características del computador.....	47
5.10 ELEMENTOS DE LA MISIÓN	47
5.10.1 Aplicación:.....	48

5.10.2 Segmento Espacial (plataforma del satélite):.....	48
5.10.3 Segmento Espacial (carga útil del satélite):.....	48
5.10.4 Arquitectura de control, comando y comunicaciones:.....	48
5.11 ANÁLISIS FUNCIONAL.....	49
5.12 <i>SOFTWARE</i> E INSTRUMENTACIÓN EMPLEADOS	50
5.13 CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS	55
6. RESULTADOS.....	56
6.1 RESULTADOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR DE UN CUBESAT DE BAJO COSTO	56
6.1.1 Arquitectura física.....	56
6.1.2 Arquitectura funcional	57
6.1.3 Costos.....	57
6.2 COMPARACION	59
7. CONCLUSIONES	61
7.2 CONTRIBUCIONES	62
7.3 LIMITACIONES.....	62
7.4 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	69
ANEXO A CÓDIGO PARA ARDUINO	70
ANEXO B CODIGO PARA MATLAB	71
ANEXO C TABLA DE REQUERIMIENTOS.....	77
ANEXO D TABLA DE ESPECIFICACIONES Y ESPECIFICACIONES.....	78



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Página dejada en blanco intencionalmente.

1. RESUMEN

El desarrollo de pequeños dispositivos electrónicos para la investigación espacial conocidos como *CubeSat* o picosatélites, han permitido que universidades, entidades privadas, públicas y militares puedan acceder al espacio a un bajo costo, comparados con grandes proyectos satelitales; es por esto que se plantea la construcción de un prototipo de *CubeSat* con materiales de bajo costo, conseguidos en la industria local, que tenga la capacidad de registrar datos de temperatura y actitud para ser enviados en tiempo real a una estación terrena y ser presentados de manera gráfica mediante un *software* de tratamiento de datos. Con este proyecto se pretende generar interés por parte de los alumnos del programa de ingeniería aeronáutica de la fundación universitaria los libertadores, además de incentivar la investigación espacial en los docentes en pro de la realización de nuevos proyectos de investigación en esta área. El desarrollo de este proyecto está basado en la metodología de diseño de sistemas llamada Ingeniería de Sistemas, con la cual se logra la construcción del prototipo *CubeSat* de bajo costo. El documento muestra la integración del *hardware* del *CubeSat* y la visualización de los datos mediante una interfaz gráfica programada en MATLAB. Por último se presenta una discusión entre los resultados obtenidos con el desarrollo del prototipo de bajo costo y sus ganancias en términos académicos y presupuestales en comparación con proyectos educativos ya realizados.

Palabras clave: Pico y Nanosatélite. Ingeniería de sistemas. Proceso de desarrollo.

2. INTRODUCCIÓN

El 4 de octubre de 1957¹ fue lanzado al espacio y puesto en órbita el primer satélite artificial por ingenieros del programa espacial de la Unión de las Repúblicas Socialistas y Soviéticas [URSS], el Sputnik I (ver Imagen 1); los sensores, fuentes de alimentación y sistemas de comunicación estaban contenidos en una esfera de aluminio de 58 cm de diámetro que conformaba una masa de 83,6 kg.² Con este instrumento se buscaba caracterizar el comportamiento de las capas altas de la atmósfera y la propagación de las ondas de radio en la ionosfera.

Imagen 1. Réplica del Sputnik 1



Esta replica se encuentra en el Museum of Flight. De la ciudad de Seattle-Washington Fuente. Museum of Flight. <http://www.museumofflight.org/spacecraft/sputnik>, Imagen recuperada el 15 de Junio de 2018

Con tres semanas de operación el Sputnik I logró transmitir datos de temperatura y presión, marcando el inicio en actividades de investigación espacial,³ desde entonces otras naciones han desarrollado tecnología necesaria para llevar cargas orbitales con diferentes objetivos. Para el 2017,⁴ el 60% de los 194 países del mundo han puesto un satélite en órbita, siendo

¹ LAUNIUS. Roger D. Reconsidering Sputnik: Forty Years Since the Soviet Satellite. New York: Routledge, 2000 ix p.

² NASA Space Science Data Coordinated Archive Sputnik 1 NSSDCA/COSPAR ID: 1957-001B [En línea]. Disponible en <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1957-001B>

³ Ibid., NSSDCA/COSPAR ID: 1957-001B.

⁴ Union of Concerned Scientists Science for a healthy planet and safer world. Cambridge, Massachusetts, UCS

Estados Unidos y Rusia los países con mayor operación para el uso comercial, investigativo y militar.⁵

Para el desarrollo de un satélite se requiere inversión en tecnología y personal altamente calificado que permita adelantar proyectos de investigación y exploración espacial. Sin embargo, en Colombia es muy poco lo que se ha avanzado en estudios o lanzamientos realizados; fue solo hasta el Plan Nacional de Desarrollo⁶ (2006–2010) donde se estableció como área prioritaria el desarrollo y uso de tecnologías espaciales que contribuyeran a mejorar el conocimiento y observación del territorio, de esta manera se creó la Comisión Colombiana del Espacio [CCE] por medio del Decreto 2442 de 2006,⁷ como organismo intersectorial con participación de Colciencias, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y entidades estatales. Mientras se establecía la comisión, estudiantes y docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Sergio Arboleda diseñaron y lanzaron con éxito la misión espacial Libertad I,⁸ un *CubeSat* que fue puesto en órbita el 17 de abril de 2007 realizando un estimado de 2300 transmisiones con datos de temperaturas en tiempo real y velocidades de órbita. Lo que evidenció el esfuerzo y perseverancia de esta institución académica, no obstante la [CCE] once años después no ha presentado mayor avance y el país ha quedado rezagado frente a naciones de América Latina como Brasil, Argentina, México, Venezuela, Ecuador y Chile,⁹ quienes han avanzado con satélites en órbita, es decir, hay una falla en la

Satellite Database, 2017. Disponible en

<http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database#.Wa3i2bljHIX>

⁵ *Ibíd.*, UCS Satellite Database, 2017.

⁶ Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010: Estado Comunitario: desarrollo para todos Tomo II : [En línea] 2007, 506 p. Disponible en

https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/pnd/pnd_tomo_2.pdf

⁷ DECRETO 2442 DE 2006. Diario Oficial No. 46.336. [En línea]. Colombia. 2006, Disponible en https://www.cce.gov.co/sites/default/files/adjutnos_basic_page/Decreto%202442%20del%2018%20de%20julio%20del%202006.pdf

⁸ JOYA. Raúl Andrés, SANCHEZ. Sergio Andrés. Desarrollo Aeroespacial en Colombia, Misión Satelital Libertad 1 y Libertad 2, Bogotá Robótica, Planetario Distrital de Bogotá, 2013. p. 1 – 2

⁹ CERVANTES. Felipe Castro. El Tiempo. En. Colombia, rezagada en desarrollo satelital. 4 de mayo de 2013

consecución de una política decisiva por parte del Estado; desde el 2013 la Fuerza Aérea Colombiana ejerce la dirección de la [CCE].¹⁰

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo e implementación de tecnología espacial en cada país es de suma importancia; su uso provee las herramientas para lograr una evolución no solo en el campo científico sino en la calidad de vida de los habitantes, por ejemplo, servicio de internet para todo el territorio, mejoramiento de las comunicaciones, servicios meteorológicos y de observación para la agricultura permitiendo avances en términos de producción, telecomunicaciones y seguridad donde se emplean satélites militares que ayuden a proteger el territorio nacional, combatir el narcotráfico, minería ilegal y otras potenciales funciones que podría desempeñar.

Los *CubeSat* han sido objeto de investigación para desarrollo tecnológico y de comunicaciones; en Latinoamérica, Colombia dio el primer paso al poner en órbita el primer *CubeSat* de la región con el Libertad I¹¹ y para el año 2018 se está trabajando en el Libertad II, igualmente el satélite FACSAT-1 desarrollado por la Fuerza Aérea Colombiana [FAC] que se prevé será lanzado en el primer semestre del 2018,¹² apoyados por la empresa Colombiana *Sequoia Space*¹³ quienes han colaborado en proyectos para países como Chile, Ecuador y Perú. La [FAC] prepara un segundo satélite el FACSAT-2 para el año 2019;¹⁴ de

¹⁰ Comisión Colombiana del Espacio - CCE [En línea]. Disponible en <https://www.cce.gov.co/la-cce>

¹¹ SOLÓRZANO. María F. prensalibre.com. *CubeSat* Guatemala. ¿Para qué se usan los satélites pequeños similares al que enviará Guatemala? [En línea] Febrero 10-2018 [citado Mayo 23, 2018]. Disponible en <http://www.prensalibre.com/vida/tecnologia/CubeSat-Guatemala-para-que-se-usan-los-CubeSats>

¹² vanguardia.com. Colombia pondrá su segundo satélite en el espacio, desde la India [En línea] Febrero 22-2018 [citado Mayo 23, 2018]. Disponible en <http://www.vanguardia.com/mundo/tecnologia/425365-colombia-pondra-su-segundo-satelite-en-el-espacio-desde-la-india>

¹³ LÓPEZ. Néstor A. La firma colombiana que fabrica satélites se reenfoca [En línea] Febrero 2-2017 [citado Mayo 23, 2018]. Disponible en <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/empresa-colombiana-que-fabrica-satelites-amplia-su-portafolio-de-servicios-503117>

¹⁴ La Fuerza Aérea Colombiana pondrá en órbita un segundo satélite de vigilancia en 2019 [En línea]. [citado junio 12, 2018]. Disponible en <http://www.webinfomil.com/2018/01/la-fuerza-aerea-colombiana-pondra-en.html>

igual modo la Universidad Distrital de Bogotá se encuentra desarrollando un *CubeSat* de 1U para investigación en los campos de la telemedicina, entrenamiento y desarrollo de su propio programa espacial.¹⁵ Aun con el esfuerzo depositado en estos proyectos, se evidencia la falta de apoyo, en recursos y entrenamiento de individuos con talento para generar el interés de avanzar con esta línea de investigación.

Es por ello que se plantea el interrogante ¿Es posible construir un prototipo de un *CubeSat* con bajo presupuesto; para estudiantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores que ayude a fomentar el interés e investigaciones en este campo?

2.2 JUSTIFICACIÓN

Los humanos desde inicios de los tiempos se han sentido atraídos por el cielo, las estrellas y lo que hay más allá de la tierra, tras una necesidad de entender su posición en el cosmos y satisfacer su curiosidad, visualizaron la importancia del desarrollo de la tecnología espacial.

Es por ello que existe una necesidad latente de continuar implementando un diseño de investigación continua ya sea basados en metodologías como las de la *National Aeronautics and Space Administration* [NASA] y la *European Space Agency* [ESA] o bien que los estudiantes comiencen a interesarse por una metodología de investigación formativa, autónoma y experimental que como resultado permita programar y diseñar modelos o prototipos con características reales de un satélite con misión espacial, que integre campos interdisciplinarios que posibiliten el trabajo colaborativo, lo que implicaría aplicar el conocimiento teórico para el crecimiento académico y profesional.

El desarrollo de un *CubeSat* permitirá la simulación del funcionamiento de un satélite artificial que se podría diseñar en un menor tiempo y su costo sería mucho menor en

¹⁵ '*CubeSat*-UD' el satélite aeroespacial de la Universidad Distrital. 2019 [En línea]. [citado junio 12, 2018]. Disponible en <http://laud.udistrital.edu.co/noticias/%E2%80%98CubeSat-ud%E2%80%99-el-sat%C3%A9lite-aeroespacial-de-la-Universidad-distrital>

comparación con uno de gran tamaño.¹⁶ No obstante, su implementación requiere personas calificadas, lo que contribuirá al conocimiento y experiencia de los estudiantes que opten por esta línea de investigación, permitiendo el trabajo multidisciplinario, que involucra un conocimiento en desarrollo integral en áreas como electrónica, programación, diseño y modelado matemático entre otros. La realización de este proyecto podría catalogarse como el primer escalón en la investigación y diseño de satélites, aprovechando el conocimiento de docentes con experiencia en el campo.

2.3 ALCANCE

Se plantea la construcción de un prototipo de un satélite tipo *CubeSat* 1U,¹⁷ empleando los conocimientos adquiridos durante el pregrado. Su función técnica será la de realizar mediciones de temperatura y actitud en tiempo real, las cuales serán enviadas inalámbricamente a una estación terrena para ser presentadas de manera gráfica mediante un *software* de procesamiento de datos.

Uno de los aspectos más importantes del proyecto es la utilización de dispositivos de bajo costo que cumplan con las características de integración al sistema. Con un diseño que permita realizar cambios, actualizaciones y mejoras. Así mismo, fomentar el interés de estudiantes y docentes en este gran campo de investigación y desarrollo.

2.4 METODOLOGÍA

En el proyecto se emplea la investigación aplicada, que según Cegarra,¹⁸ la información se encuentra en diversas fuentes bibliográficas para ser analizada, seleccionada y empleada, eso sí, con talento y trabajo. A manera de ejemplo, en sus inicios; Japón utilizó los conocimientos

¹⁶ RICHARDSON, SCHMITT, COVERT, ROGERS. Small Satellite Trends [En línea] 2009-2013, p. 1 – 3 Disponible en <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3212&context=smallsat> descubrir.

¹⁷ Un cubo de 10x10x10 y un peso no mayor a 1 kilogramo

¹⁸ CEGARRA. José, Metodología de la investigación científica y tecnológica, Ediciones Díaz de Santos, Madrid: 2017, 44 p.

científicos de los países occidentales desarrollados para fundamentar su desarrollo tecnológico empleando esta técnica de investigación.

La metodología consta de cuatro fases:

- Fase I: Recolección de información.
- Fase II: Diseño Conceptual.
- Fase III: Diseño Preliminar.
- Fase IV: Pruebas.

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 Objetivo General

- Realizar la construcción de un prototipo *CubeSat* de bajo costo.

2.5.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar el diseño conceptual de un *CubeSat* de bajo costo.
- Hacer el diseño preliminar de un *CubeSat* a través de un prototipo funcional.
- Implementar una simulación funcional de toma de datos de temperatura y actitud mediante *software*.

2.6 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El trabajo está estructurado en los siguientes Capítulos.

Capítulo 1 – Resumen: se da una breve descripción del trabajo desarrollado.

Capítulo 2 - Introducción: presentación de los objetivos del proyecto, justificación, metodología utilizada y alcance.

Capítulo 3 - Marco Teórico: presentación de la información teórica para la realización del trabajo.

Capítulo 4 - Diseño conceptual de un *CubeSat* de bajo costo: definición de los subsistemas que se utilizan y sus requerimientos.

Capítulo 5 - Proceso de desarrollo: Diseño preliminar selección de los subsistemas, materiales usados, proceso de integración de todos los subsistemas, *software* y plataformas utilizadas.

Capítulo 6 – Resultados: resultados del proyecto y comparación con algunos proyectos tipo *CubeSat*

Capítulo 7 – Conclusión: se exponen las contribuciones, objetivos alcanzados, limitaciones durante el proyecto y trabajos futuros.

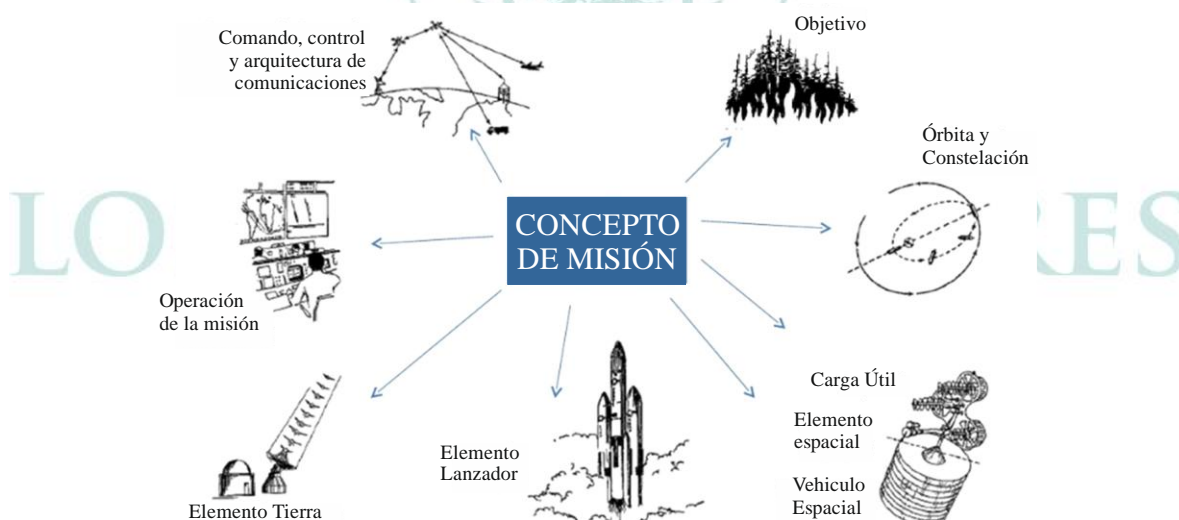
LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

3. MARCO TEÓRICO

3.1 SISTEMAS ESPACIALES

Un sistema, hace referencia a la unión de diferentes elementos que al trabajar en conjunto obtienen el resultado deseado, en el sector espacial estos elementos se encuentran en órbita de la tierra y en su superficie terrestre; combinando ciencia y tecnología, lo que permite la obtención y transmisión de datos con fines científicos, comerciales y militares, esto dependiendo de las necesidades del desarrollador. Los elementos, o partes como se muestran en la Imagen 2.

Imagen 2. Elementos de una misión espacial



Adaptado de: LARSON Wiley J. y WERTZ James. Space Mission Analysis and Design. Estados Unidos, 1999, p. 11

Estos elementos, pueden incluir personas, *hardware*, *software*, instalaciones, políticas y documentos; es decir, todas las cosas necesarias para producir resultados a nivel de un sistema también llamado la arquitectura de la misión, conformada por siete (7) elementos.¹⁹

¹⁹ ORDUY. Jaime Enrique, processo de referência para o desenvolvimento da arquitetura de uma estação terrena para pico e nanosatélites. Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Gerenciamento de Sistemas Espaciais. São José dos Campos - SP – Brasil. Instituto Nacional de

1. Aplicación: objetivo principal para el cual la misión es construida.
2. Segmento Espacial (plataforma del satélite): corresponde a los subsistemas principales del satélite.
3. Segmento Espacial (carga útil del satélite): comprende todos los equipos que ejecutan el objetivo para el cual el satélite fue construido.
4. Segmento Misión: consiste en el personal y los equipos para realizar la operación de la misión.
5. Órbita: corresponde al curso o trayectoria que tomara el segmento espacial en órbita.
6. Arquitectura de control, comando y comunicaciones: corresponde al conjunto de componentes que cumplen los requisitos de los enlaces de comunicación, y control entre los segmentos.
7. Segmento lanzador: incluye la infraestructura de lanzamiento y el cohete que enviará el vehículo espacial a la órbita.

3.2 MISIONES ESPACIALES

Las misiones con satélites tradicionales inician como una contribución al Año Geofísico Internacional (1957-1958),²⁰ establecido por la Organización de las Naciones Unidas [ONU] y marcó el inicio de la era de los satélites artificiales. Su principal propósito era el de proveer datos acerca del campo gravitatorio de la tierra y caracterizar el comportamiento de la ionosfera, funcionando durante tres semanas hasta que falló sus sistema de baterías.²¹ De esta manera se generó la necesidad de continuar con las investigaciones para descubrir que otros usos se le podrían dar a esos sistemas espaciales.

Pesquisas Espaciais – INPE, 2016. 8 – 9 p.

²⁰ NEEDELL. Allan A. The First 25 years in space. Michigan. Smithsonian Institution Press, 1983. 41 p.

²¹ GARCÍA. Romero Eladio. Breve historia de la Guerra Fría. Ediciones Nowtilus S.L., 2018.

En respuesta al programa *Sputnik* Soviético, Estados Unidos lanzó el *Explorer I*,²² que tenía como propósito el estudio del ambiente del espacio, no obstante las misiones también enfocaron sus esfuerzos en otros objetivos. En 1962 fue lanzado el primer satélite con objetivo comercial el *Telstar-1* (ver Imagen 3) que ofrecía canales de voz y televisión; después de estos lanzamientos vinieron otros como el satélite Ruso Iskra-2 en 1982, Amsat Oscar-10 en el año 1983, el Japonés Fuji-1, el Coreano KitSat-1 en 1992, entre otros.²³

Imagen 3. Misiones espaciales



En la Imagen 3 se observa al satélite experimental *Explorer 1*, al satélite de comunicaciones *Telstar-1*, al satélite experimental de comunicaciones *TemiSAT*, al satélite de comunicaciones para radio aficionados *Fuji-1*, al satélite de observación *KitSat-1* y al satélite de comunicaciones para radio aficionados *Amsat Oscar-10*. Fuente: AURIOLES. Análisis y evaluación de tecnologías para pequeños satélites. México 2007, p. 11-14.

Cincuenta años después del primer lanzamiento, el avance de los sistemas electrónicos, de comunicación y el desarrollo tecnológico han permitido realizar proyectos que en décadas anteriores resultarían económicamente inviables o imposibles. En 1999, el profesor Jordi Puig-Suari de la *California Polytechnich State University* y el profesor Robert Twiggs de *Stanford* implementaron las especificaciones de un satélite de menor presupuesto y tamaño

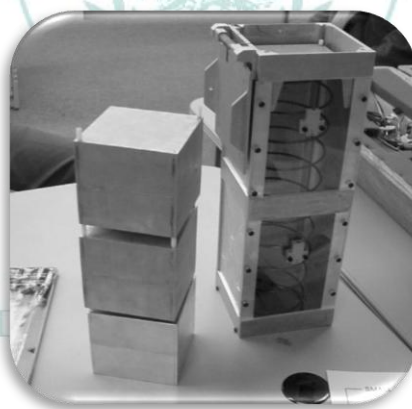
²² RUBIO. Alberto M. Breve historia de la carrera espacial. Madrid. Nowtilus S.L., 2010. 93 p.

²³ AURIOLES. Óp. Cit., p. 10 - 26

denominado *CubeSat*²⁴ por su forma geométrica; en su estudio plantearon los requerimientos para crear un prototipo miniatura que lograra tener la capacidad tecnológica similar a la del primer satélite artificial lanzado al espacio.

La necesidad apareció cuando estudiantes de la Universidad de *Stanford* desarrollaban el proyecto [OPAL] a finales de los 90's, logrando obtener un picosatélite con un sistema de despliegue demasiado complejo y sus resultados no fueron del todo satisfactorios. Para continuar con el proyecto el profesor Twiggs desarrollo con el equipo de la *Defense Advanced Research Projects Agency* [DARPA]²⁵ (ver Imagen 4); una lanzadera que mantenía los satélites en su interior mediante una compuerta retráctil, para después ser empujados por medio de un resorte.

Imagen 4. Prototipo de lanzadera para *CubeSat*



Fuente: PUIG, S. Jordi, TURNER, Clark, TWIGGS, J. Robert. The Development and Launch Support Infrastructure for Eighteen Different Satellite Customers on One Launch. 15TH Annual/USU Conference on Small Satellites Estados Unidos, 2001 p. 2

No obstante, el proyecto [OPAL]²⁶ contaba con unas dimensiones de 10.1 x 7.6 x 2.5 cm, las cuales presentaban un problema al no permitir que paneles solares fuesen instalados en toda su superficie. El profesor Twiggs buscó una manera más sencilla de desarrollar un

²⁴ Prof. Jordi Puig-SUARI. Prof. TWIGGS Robert J. Óp. Cit., p. 2 - 19

²⁵ Agencia del Departamento de Defensa de Estados Unidos responsable del desarrollo de nuevas tecnologías para uso militar

²⁶ ENGBERG, OTA, SUCHMAN. Óp. Cit., p. 2 - 11

picosatélite e impulso la idea de un cubo de 10 cm de arista, idea que fue presentada al profesor Puig-Suari en el verano de 1999 dando inicio a lo que hoy se conoce como *CubeSat*, es decir, de 1957 a 1998 se construyeron satélites grandes, robustos y pesados; sin lugar a dudas la tesis del Doctor Twiggs inició la era de los satélites pequeños siendo 1999²⁷ el año donde se oficializó el término de picosatélite, con masa máxima total de un (1) kg. Esto ha permitido que académicos y aficionados puedan realizar sus investigaciones espaciales, siendo usado en estudios de meteorología, comunicaciones, investigación científica, militar, navegación, observación de la tierra, entre otras.

En la Imagen 5 se puede observar al proyecto OPAL

Imagen 5. Proyecto OPAL



Fuente: OPAL. Orbiting Picosatellite Automatic LauncherClark, Recuperado el 15 de junio de 2018 disponible en. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/opal>

3.3 SATÉLITES

Se entiende por satélite cualquier elemento que se encuentre orbitando alrededor de un cuerpo²⁸. Existen satélites naturales como la luna, otros planetas y asteroides, también existen los artificiales; desarrollados y puestos en órbita desde la tierra para mantener un rumbo sobre un cuerpo, hasta completar la misión para la cual fue creado.

²⁷ RODRÍGUEZ-OSORIO, CALVO, LANDEROS, JIMÉNEZ. TelCUBE: Implementación de un Project Based Learning multidisciplinar para el desarrollo de un picosatélite [En línea]. Madrid: Disponible en http://oa.upm.es/8147/1/INVE_MEM_2010_81413.pdf

²⁸KANE. Joseph, STERNHEIM Morton M. Física. Reverté. 1989, p. 118.

Los satélites artificiales son desarrollados para realizar misiones espaciales en los campos de investigación, comunicaciones, meteorología, observación, militares, entre otros. En la Imagen 6 se observa al satélite meteorológico *JPSS-1*.

Imagen 6. Satélite meteorológico JPSS-1



Fuente. GRANATH. Bob. JPSS-1 to Provide More Accurate Environmental Forecasts. <https://amsat-uk.org/pod-orbital-deployer/>, Imagen recuperada el 13 de Junio de 2018

3.4 CLASIFICACIÓN

Los satélites se pueden encontrar de diversas formas y tamaños, también dependiendo de su uso están los científicos, de telecomunicaciones o militares. A partir de todo esto se expone la principal forma de clasificación de los satélites que viene dada por su masa, como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de satélites

NOMBRE	MASA	CLASIFICACIÓN
Largo	> 1000 kg	Grandes
Mediano	500 a 1000 kg	Medianos
Mini	100 a 500 kg	Pequeños
Micro	10 a 100 kg	Pequeños
Nano	1 a 10 kg	Pequeños
Pico	0.1 a 1 kg	Pequeños
Femto	< 100 g	Pequeños

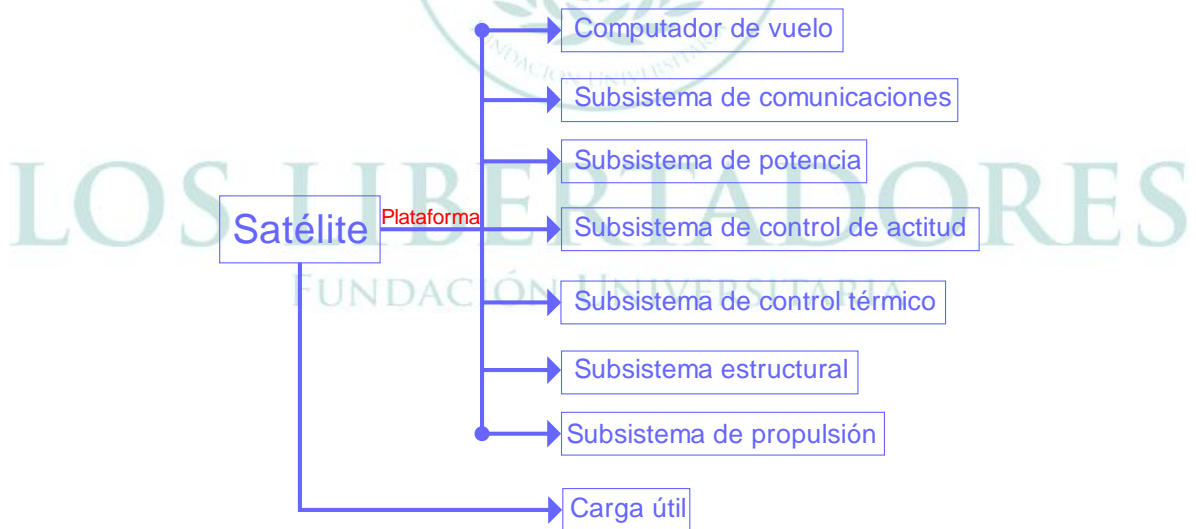
Fuente: AURIOLES. Análisis y evaluación de tecnologías para pequeños satélites. México 2007, p. 9

Los avances tecnológicos en el campo de los satélites, van direccionados a la reducción de costos y tamaño así como incrementar la calidad de los servicios prestados.²⁹

3.5 SUBSISTEMAS DE SATÉLITES

Un satélite está dividido principalmente en dos partes como se puede ver en el Diagrama 1, la plataforma y la carga útil, la carga útil es la encargada de realizar la misión del satélite, y la plataforma es la encargada de darle soporte al funcionamiento del satélite como energía, posicionamiento, comunicaciones, trabajo a determinados niveles de temperatura, entre otros. De este modo la plataforma, es el conjunto de subsistemas que dependen uno del otro para lograr el correcto funcionamiento del satélite.³⁰

Diagrama 1. Subsistemas de un satélite



Adaptado de: ORDUY. Processo De Referência Para O Desenvolvimento Da Arquitetura De Uma Estação Terrena Para Pico E Nanosatélites. Brasil 2016, p. 10

²⁹KUMAR M. Anil, AGRAWAL. Varsha, Satellite Technology: Principles and Applications. WILEY. 2006, p. 18

³⁰CHARTRAND. R. Mark. Satellite Communications for the Nonspecialist. SPIE Press, 2004 p. 208

3.5.1 Subsistema de Computador de vuelo.

El Subsistema de Computador de vuelo se encarga de almacenar y ejecutar la programación que se haya realizado, distribuir comandos a otros subsistemas, así como la función de recoger, procesar y generar reportes del estado del satélite, también conocido como telemetría. Desde el punto de vista del *hardware* es la unidad central [CPU] del satélite con la que se tiene comunicación desde tierra.³¹

3.5.2 Subsistema de comunicaciones.

Está compuesto por antenas y transpondedores, es el encargado de que el satélite reciba y envíe información o comandos desde las estaciones en tierra, con este sistema también se puede establecer comunicaciones con otros satélites ya que pueden o no estar diseñados para trabajar en conjunto, también llamado constelaciones como el [GNSS].³²

3.5.3 Subsistema de potencia.

Se encarga de generar, almacenar y suministrar energía a cada una de las partes electrónicas y actuadores mecánicos del satélite, compuesto por paneles solares, baterías y demás elementos necesarios para la regulación de energía y protección de sobrecargas en los subsistemas; siendo el subsistema de comunicaciones el que más consume energía, el subsistema de potencia apaga los transpondedores cuando no se encuentran en uso, como por ejemplo los eclipses.³³

³¹ CHARTRAND, Op., Cit., p. 209

³² CHARTRAND, Op., Cit., p. 221

³³ CHARTRAND, Op., Cit., p. 217

3.5.4 Subsistema de control de actitud.

Tiene la función de mantener posicionado correctamente el satélite para el envío y recepción de información desde o hacia tierra, así como la corrección de órbita y exposición óptima a la luz solar para cargar el sistema de baterías. Está compuesto por un sistema de ruedas de reacción que mantienen o modifican el momento angular del satélite, esto sin la necesidad de consumir combustible al estar compuesto normalmente por motores eléctricos.³⁴

3.5.5 Subsistema de control térmico.

El subsistema de control térmico es el encargado de regular la temperatura de todos los subsistemas del satélite producida por diversos factores como el sol, la tierra, la radiación interna que generan los equipos electrónicos, entre otros. Su función es la de mantener los equipos funcionando en un rango de temperatura óptimo, esto logrado por un sistema de conductos que transportan líquidos refrigerantes como el amoníaco, que al evaporarse se dirige por presión al extremo frío donde se encuentra el radiador para luego volver a ser recirculado.³⁵

3.5.6 Subsistema estructural.

Este subsistema brinda una estructura donde se instalan todos los subsistemas, dando rigidez al satélite. El diseño de este subsistema debe pasar por pruebas térmicas, de resistencia, esfuerzo, eléctricas, conductivas, entre otras. Para validar su uso en una misión espacial.³⁶

3.5.7 Subsistema de propulsión.

Así como el subsistema de control de actitud que modifica la posición del satélite, el subsistema de propulsión es usado para incrementar o disminuir la velocidad, con el fin de

³⁴ CHARTRAND, Op., Cit., p. 218

³⁵ CHARTRAND, Op., Cit., p. 211

³⁶ CHARTRAND, Op., Cit., p. 218

mantener o corregir su órbita. También es usado principalmente en la etapa de colocación del satélite dando comienzo a su vida útil. El mantenimiento de esta posición se ve limitado por el consumo de combustible que finalmente provoca la finalización de la misión.³⁷

3.6 CARGA ÚTIL O MÓDULO DE MISIÓN

Es el conjunto de elementos dedicados a realizar la misión del satélite, compuesto por sensores que miden diferentes fenómenos que no se pueden medir desde la tierra o se quieren medir desde el espacio, entre estos fenómenos están: temperatura, radiación y campo magnético entre otros. La carga útil depende estrechamente de la misión del satélite y está compuesto por diferentes equipos de acuerdo a la función que desempeñará, tales como cámaras para captura de imágenes y antenas para transmisión de televisión, internet o telefonía.³⁸

3.7 CUBESAT

Con el paso de los avances tecnológicos y la aparición de dispositivos electrónicos más pequeños y potentes que permiten una gran disposición para su uso e integración, nació la necesidad de actividades académicas que desde su aparición son explotadas por alumnos y profesores de diferentes universidades al realizar misiones espaciales de bajo costo y cumpliendo con las exigencias de diseño, manufactura, pruebas, integración y lanzamiento como en un satélite convencional.

Al inicio de las investigaciones con *CubeSat* era común que las misiones fallaran por falta de estudios previos y experiencia, tal es el caso de los proyectos CanX-1 de la *University of Toronto Institute for Aerospace Studies* [UTIAS] y el DTUsat del *Technical University of Denmark* [DTU] donde las estaciones terrenas no establecían comunicación con estos

³⁷ CHARTRAND, Op., Cit., p. 218

³⁸ CURSO Introducción a los Sistemas Espaciales. Agencia Espacial Mexicana. [En línea]. Disponible en: http://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images/normateca/pdf/CURSO_ISE/Modulo_3.pdf

satélites una vez puestos en órbita, de igual forma en el caso del +AAU *CubeSat* de la *Aalborg University* [AAU], presentó problemas en su sistema de alimentación (baterías);³⁹ pero fue esto mismo, lo que permitiría dar los primeros pasos hacia el éxito de las misiones pioneras como el *QuakeSat* de la Universidad de *Stanford*, lanzado el 30 de Junio 2003, diseñado como un satélite de observación cuyo principal objetivo fue probar la hipótesis de que las *Extremely low frequency* [ELF] son las causantes de terremotos, teoría que aún sigue siendo disputada.⁴⁰ En la Imagen 7 se puede observar a un *CubeSat* de estándar 1U.⁴¹

Imagen 7. *CubeSat* 1U



Fuente. Imagen. Disponible en <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasas-icecube-no-longer-on-ice>. Recuperado el 18 de junio 2014

El *CubeSat* es un pequeño dispositivo de 0.1 a 1 kg, creado para monitorear diferentes estados a su alrededor, los cuales son transmitidos a estaciones de monitoreo en la tierra, de esta forma los *CubeSat* son la respuesta para acceder al espacio reduciendo la complejidad, acortando el cronograma de construcción, los costos y probando la viabilidad del uso de componentes *commercial off the shelf* [COTS],⁴² es decir, compatible con componentes

³⁹ ESIONWU. Chris A. A.1 Comprehensive List of *CubeSat* Missions [En línea]. Disponible en http://www.academia.edu/7787703/List_of_CubeSat_Missions.pdf

⁴⁰ *CubeSat* Database [En línea] <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database>

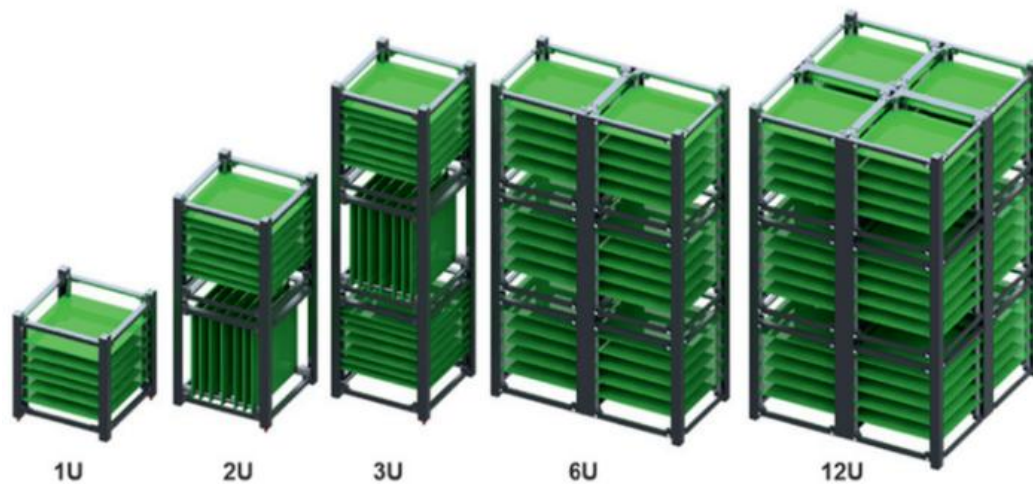
⁴¹ 1U hace referencia al estándar *CubeSat* para un cubo de 10x10x11.3

⁴² BEYDEDA. Sami, GRUHN. Volker. Testing Commercial-off-the-Shelf Components and Systems. Springer Science & Business Media: Leipzig, 2005. 5 p.

comerciales de serie. Puede convertirse en un modelo en el que los estudiantes participen en el diseño, construcción, lanzamiento y operación como pequeños experimentos en el entorno espacial.

La Imagen 8, explica que una diferencia de tamaño da la posibilidad de llevar una mayor carga útil dependiendo de los objetivos que se quieran conseguir y la complejidad de la misión.

Imagen 8. Comparación de *CubeSat* por tamaño



Fuente. EMERY William y CAMPS Adriano, Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Applications, 2017, p. 800

3.8 SATÉLITES UNIVERSITARIOS

El desarrollo de misiones *CubeSat* se ha caracterizado por ser un amplio campo de investigación en universidades, donde los estudiantes optan por este tipo de proyectos para sus trabajos de grado; Se estima que para el 2018 el número de proyectos *CubeSat* y *NanoSat* lanzados por universidades y agencias espaciales en todo el mundo superara los 1500, donde Latinoamérica para este mismo año tiene una participación de 42 proyectos *CubeSat* que se encuentran en etapa de desarrollo, concluidos, cancelados o simplemente no terminaron siendo lanzados; siendo Brasil con 12 *CubeSat*, el país con más misiones realizadas,

mencionando que no todas han sido exitosas y entre ellas se encuentran proyectos con una extensa línea de investigación que tienen previsto su lanzamiento para el año 2020 como lo es el Garathea-L; *CubeSat* categoría 6U que orbitará la luna y realizará experimentos de astrobiología con el estudio de los efectos de la microgravedad en diferentes formas de vida. Después de Brasil esta Perú con cuatro (4) lanzamientos, Ecuador con tres (3) y Argentina con dos (2); en la lista de países Latinoamericanos también están: Ecuador, Chile, Colombia, Costa Rica, Guatemala, México y Uruguay.

En la Imagen 9 se observa el concepto del Garatea-L

Imagen 9. Garatea-L



Fuente. Imagen. Disponible en <http://www.garatea.space/a-missao-garatea/>. Recuperado el 15 de junio 2018

El panorama demuestra que los países de la región cuentan con el talento humano para realizar estudios espaciales pero en cuanto a desarrollo tecnológico se evidencia una gran brecha al ser comparados con grandes potencias. Aunque este atraso también podría ser causado por la falta de recursos que apoyen un proyecto de este tipo. A diferencia de países como Estados Unidos que entre universidades, entidades militares y agencias espaciales han

financiado alrededor de 1230 proyectos⁴³ porque han comprendido que el *CubeSat* abrirá un gran mercado para el desarrollo de estos sistemas en las próximas décadas.⁴⁴

3.9 LIBERTAD 1

El Libertad 1, mostrado en la Imagen 10; fue el primer satélite Colombiano y Latinoamericano puesto en órbita por la Universidad Sergio Arboleda el 17 de abril de 2007 a bordo del cohete Dnepr-1 desde el Cosmódromo de *Baikonur* junto con 14 satélites de diferentes instituciones del mundo. Para el 2018, en la Universidad Sergio Arboleda se está trabajando en un segundo *CubeSat*, el Libertad 2 que cumplirá con el estándar 3U y se prevé su lanzamiento para finales del 2019.⁴⁵

Imagen 10. Libertad 1



Fuente. Imagen. Disponible en <http://www.usergioarboleda.edu.co/seis-anos-en-orbita-con-el-libertad-1/>. Recuperado el 15 de junio 2018

⁴³ Nanosatellite and *CubeSat* Database, Op., Cit.,

⁴⁴ LYTRAS Miltiadis D., ORDONEZ Patricia, ZIDERMAN Adrian, ROULSTONE Alan, MAURER Hermann, IMBER Jonathan B. Knowledge Management, Information Systems, E-Learning, and Sustainability Research: Springer Science & Business Media, Athens 2010. p. 189-192

⁴⁵ Nanosatellite and *CubeSat* Database, Op., Cit.,

A pesar de que el Libertad I alcanzó exitosamente la órbita planeada, y sus señales de radio fueron recolectadas en su momento por diversos radioescuchas a lo largo del planeta, hasta donde se sabe; no existe publicado un reporte final que permita saber cuáles objetivos básicos de la misión fueron alcanzados y cuáles no. La información existente en la página del satélite contenía solo un listado de datos telemétricos que no ofrecen mayores luces sobre el desempeño del satélite y que al mismo tiempo no suministra con la debida perspectiva, los alcances y logros tecnológicos.⁴⁶

El Libertad I fue impulsado por el senador Álvaro Leyva el cual explica que las funciones del *CubeSat* serían múltiples: “tomar fotografías, emitir mensajes de los patrocinadores, el himno nacional, además de transmitir señales del sistema de posicionamiento global”.⁴⁷

3.10 INGENIERÍA DE SISTEMAS

Entiéndase por ingeniería de sistemas, el campo de aplicación multidisciplinar que permite estudiar y entender el funcionamiento de los sistemas complejos. Esto independientemente del *hardware*, *software* y otros elementos que compongan dicho sistema.⁴⁸

Cuando se habla de sistemas se hace referencia a un artefacto o proceso, compuesto por un conjunto de componentes que por sí solos no podrían lograr un resultado, en concreto, la ingeniería de sistemas integra todas las disciplinas en un estructurado nivel de proceso, la unión de diferentes partes como *hardware*, *software*, personas y demás factores que se involucren en el funcionamiento de cada sistema desde las etapas iniciales del desarrollo, diseño, verificación del cumplimiento de los requisitos, planificación, costos, operación, tiempo, prueba, creación y puesta en funcionamiento.

⁴⁶ PORTILLA. José Gregorio. Óp. Cit., p. 492

⁴⁷ El Espectador, 20 de febrero de 2005.

⁴⁸ WEILKIENS. Tim. Systems Engineering with SysML/UML Modeling, Analysis, Design: Morgan Kaufmann OMG Press, 2006. p. 7-12

La ingeniería de sistemas está compuesta por 7 fases.

1. Identificar el problema
2. Investigar alternativas
3. Modelado del sistema
4. Integración
5. Pruebas del sistema
6. Análisis del rendimiento
7. Re evaluación

Comprendiendo el significado de la ingeniería de sistemas es notable que su aplicación ha sido fundamental en el desarrollo de sistemas espaciales, que basados en esto, los investigadores han implementado su propio sistema.

3.11 PROCESOS DE DESARROLLO DE SISTEMAS ESPACIALES

Según Bermúdez (2016) en su artículo: “CanSat Lata-satélite”,⁴⁹ explica las fases que componen la planeación, diseño e implementación de un prototipo de satélite con fines académicos. Estableciendo que una misión debe tener un objetivo específico y un ciclo de vida, apoyando su investigación en el manual NPR 7120.5 de la [NASA], haciendo descripción de la prefase y las 6 fases de desarrollo que deben estar documentadas y delimitadas en un cronograma. Así mismo resalta las ventajas del uso del Diagrama en V, porque permite optimizar costos, tiempo, minimizar riesgos, garantizar calidad y buen funcionamiento del proyecto.

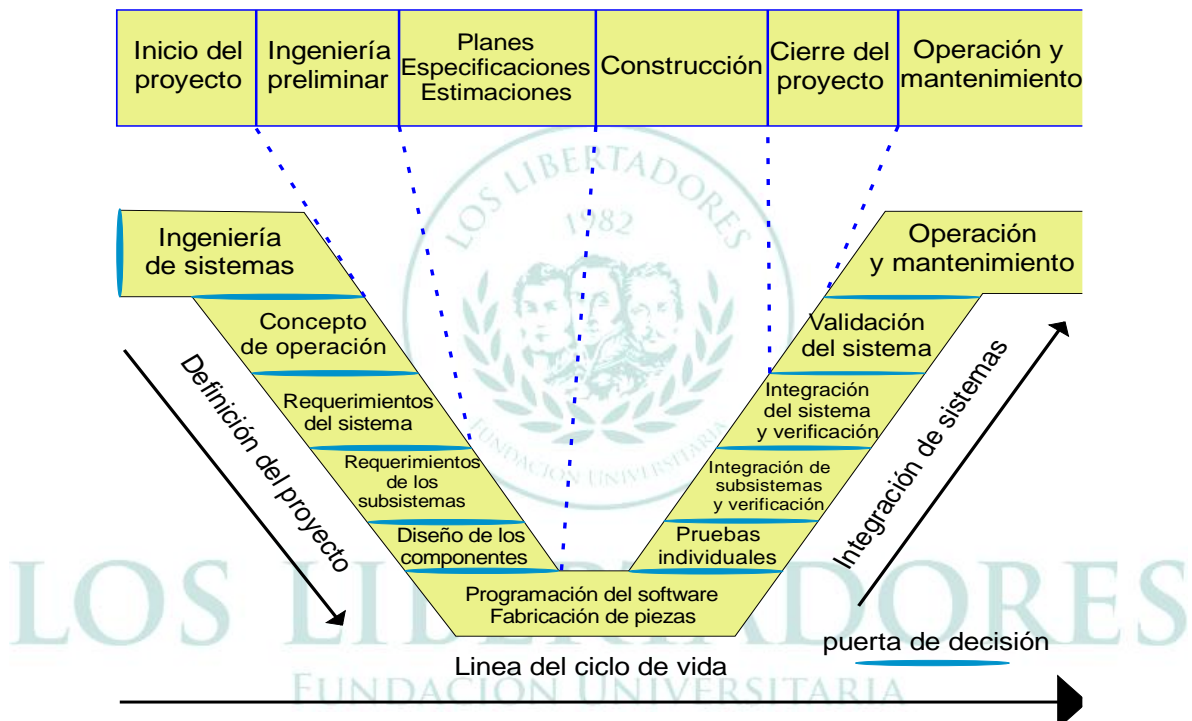
Al igual que cualquier proyecto interdisciplinar el desarrollo de una misión espacial está dada por una serie de pasos o fases, donde además de estudiar la factibilidad económica y tecnológica se busca la mejor manera de dar cumplimiento a los objetivos planteados.

⁴⁹ BERMUDEZ. Bárbara. CanSat Lata-satélite. En. Ciencia UANL. Septiembre – Octubre, 2016, vol. 81, p. 71 – 75

Comenzando desde una Prefase donde se abordan las diferentes maneras de realizar la misión y finalizando en dar unas conclusiones con el análisis de los resultados obtenidos.⁵⁰

En el Diagrama 2 se observa la distribución del diagrama en “V”.

Diagrama 2. Diagrama en V Spacecraft System Engineering



Fuente. STENGEL. Robert, Space System Design, 6p.

La descripción de las fases de desarrollo se muestra a continuación.

- Prefase: estudio conceptual, producción de ideas y alternativas para llevar a cabo la misión.
- Fase A: desarrollo de conceptos y tecnología, donde se determina la factibilidad y planeación de estrategias para establecer una línea base.

⁵⁰ NASA Systems Engineering Handbook. SP-610S, 1995 p. 13 -25

- Fase B: terminación del diseño preliminar y tecnología; define a detalle la misión y establece las necesidades para el desarrollo de la línea base de la misión.
- Fase C: diseño final y fabricación, diseño a detalle del sistema (subsistemas y su operación), fabricación del *hardware* y codificación del *software*.
- Fase D: ensamble del sistema, pruebas e integración; se realiza el lanzamiento, ensamble e integración de subsistemas, determinación y requerimientos para pruebas y lanzamiento.
- Fase E: operación y mantenimiento de la misión; identifica las necesidades de operación del sistema, así como las necesidades y condiciones del escenario de la misión.
- Fase F: cierre, análisis de datos obtenidos, conclusiones, presentación de resultados y cierre o transferencia de la misión.

3.12 DISEÑO CONCEPTUAL

Según Horvatz,⁵¹ la definición de diseño conceptual no es muy precisa al tener varias notaciones en diferentes disciplinas como el diseño mecánico, diseño industrial, arquitectura o diseño de interiores, no obstante todos estos poseen elementos en común; desde un punto de vista metodológico es el proceso creativo para la solución de un problema, habilitado por el conocimiento humano, intuición, creatividad y razonamiento.

El diseño conceptual no debe tomarse a la ligera ya que de aquí parte el desarrollo de un producto, en esta etapa se pueden encontrar varias maneras de solucionar el problema en cuestión, hasta llegar a la más adecuada para dar cumplimiento a los requerimientos funcionales, técnicos y operacionales del proyecto. El diseño conceptual es de suma importancia ya que se sientan las bases de cómo debe ser el resultado, interactuando con las diferentes fases del proyecto en cuanto a la planeación y dar respuesta a los objetivos que se planteen sin salirse del presupuesto,⁵² esta fase es la más creativa de todas al tener que

⁵¹ HORVATH. Imre. On some Crucial Issues of Computer Support of Conceptual Design. 2005. p92.

⁵² VARIOS. Diseño Conceptual. Dirección General De Estadística Dirección General Adjunta De Investigación Y

encontrar diferentes métodos para la solución de la necesidad, definiendo aspectos como el uso de materiales, sistemas eléctricos, electrónicos, mecánicos, fabricación y como lo utilizara el usuario, entre otros.

3.13 DISEÑO PRELIMINAR

La etapa de diseño preliminar es la fase que continúa al diseño conceptual, donde se desarrollan los prototipos, evaluaciones de *hardware* y *software*. En esta fase se da ejecución del cronograma, líneas de planificación y costos; el o los prototipos están sujetos a lo establecido en el diseño conceptual y tienen la función de afrontar diversas pruebas estructurales y funcionales. La importancia de esta fase es poder validar las decisiones de diseño con los objetivos que se plantearon.⁵³

Como se puede observar en la Tabla 2, en el diseño preliminar está dividido en fases.

Tabla 2. Fases del diseño Preliminar

FASE	DESCRIPCION
IMPLEMENTACIÓN	dependiendo de su disponibilidad se compran o se fabrican los elementos necesarios
INTEGRACIÓN	Integración de los elementos a un bajo nivel para validar que da los resultados deseados de un sistema de alto nivel
VERIFICACIÓN	Prueba de que el producto final cumple con los requerimientos
VALIDACIÓN	Se confirma que el producto verificado cumple con las expectativas de los interesados.
TRANSICIÓN	Preparación del producto para la transición a la siguiente etapa del proyecto

Fuente: NASA Systems Engineering Handbook, NASA SP-2016-6105 Rev2 supersedes SP-2007-6105 Rev 1 dated December, 2007. p. 14,

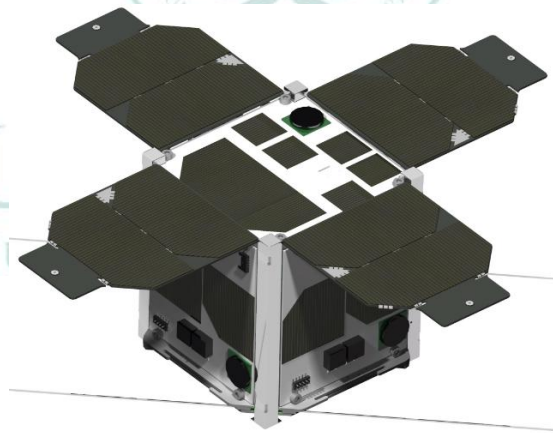
Normatividad Dirección De Normatividad. Versión preliminar. Junio 2015 [En línea]. Disponible en <http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/21-%20Manual%20para%20el%20Dise%C3%B1o%20Conceptual.pdf>

⁵³ NASA Systems Engineering Handbook, NASA SP-2016-6105 Rev2 supersedes SP-2007-6105 Rev 1 dated December, 2007. p. 25-27

4. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN *CUBESAT* DE BAJO COSTO

Como se menciona en el Capítulo 3 (Marco Teórico), el desarrollo de un sistema espacial parte de una necesidad y de ahí, encontrar las diferentes posibilidades que se pueden dar para llevar a cabo un objetivo. Para la realización de un *CubeSat*, de la misma forma que un satélite de gran tamaño se necesita de una misión o un fin para el cual será construido. Por ejemplo el *CubeSat* MOVE-II de la *Technical University of München* mostrado en la Imagen 11, que no lleva una carga útil científica real, sino que su función es probar todos sus subsistemas para que en próximas misiones pueda llevar una carga útil, esto incluye comunicaciones, manejo de datos a bordo, sistema de control de actitud, sistema de suministro de energía, estructural y sistema de control térmico.⁵⁴

Imagen 11. *CubeSat* MOVE-II



Fuente. Imagen. Disponible en <https://www.move2space.de/MOVE-II/satellite/> Recuperado el 12 de Junio de 2018

⁵⁴ MOVE-II *CubeSat* Student Technology in [En línea]. [citado Junio 12, 2018]. Disponible en [Spacehttps://www.move2space.de/MOVE-II/](https://www.move2space.de/MOVE-II/)

4.1 NECESIDAD

4.1.1 Características del proyecto

- ND001 Realizar un *CubeSat* que envíe datos de temperatura y actitud en tiempo real;
- ND002 El *CubeSat* no debe pesar más de 1 kg;
- ND003 La Estructura debe ser un cubo de 10 cm de arista;
- ND004 La inversión total en materiales y equipos electrónicos no debe superar los quinientos mil pesos (\$500.000) COP;

4.2 REQUERIMIENTOS DE LOS SUBSISTEMAS QUE COMPONEN AL *CUBESAT*

4.2.1 Requerimientos funcionales

- RF001 El *CubeSat* debe tener Sistema de baterías recargables;
- RF002 Las baterías deben recargarse con paneles solares y 110 VAC;
- RF003 Las baterías deben suministrar energía al *CubeSat* por un mínimo de 3 horas continuas;
- RF004 El *CubeSat* debe tomar datos de temperatura y actitud;
- RF005 El *CubeSat* debe enviar los datos inalámbricamente;
- RF006 Una estación terrena debe tomar los datos enviados por el *CubeSat*;
- RF007 La estación terrena debe usar un *software* para visualizar los datos tomados;
- RF008 El *Software* usado por la estación terrena debe ser compatible con *Windows 7* o superior;
- RF009 Se debe permitir hacer modificaciones a la programación del *CubeSat* para cambiar parámetros de muestreo;
- RF010 La plataforma de desarrollo debe tener compatibilidad con el lenguaje de programación C++;

4.2.2 Requerimientos técnicos

- RT001 Utilizar materiales y dispositivos de bajo costo y comunes de adquirir;
- RT002 la plataforma de desarrollo debe tener soporte técnico e información en línea;
- RT003 La plataforma debe contar con salidas de voltaje para hacer una distribución controlada de potencia a todos los dispositivos;
- RT004 El *Software* usado en la estación terrena, debe ser compatible con la plataforma de desarrollo para la visualización de datos;
- RT005 La plataforma debe contar con suficientes entradas análogas para conectar los sensores;
- RT006 La plataforma de desarrollo debe ser de bajo costo así como su peso y tamaño;
- RT007 Los sensores de actitud y temperatura deben ser compatibles con la plataforma de desarrollo;
- RT008 Los subsistemas deben estar en placas electrónicas separadas;
- RT009 Los perfiles de la estructura deben ser de material liviano de 13,2 y 10 cm de longitud;
- RT010 Se deben instalar paneles de acrílico para proteger las caras de la estructura;
- RT011 Se deben adquirir elementos de sujeción adecuados para la estructura;
- RT012 Se deben usar placas electrónicas para montaje de circuitos electrónicos;
- RT013 El *CubeSat* debe ser modular;
- RT014 Se deben usar borneras y conectores aéreos para poder desarmar el *CubeSat* en sus diferentes sistemas cuando sea necesario;
- RT015 Se deben adquirir regletas electrónicas de pines largos para el bus de datos;
- RT016 Se deben emplear fuentes secundarias y paneles de expertos con el fin de evitar costos adicionales comprando o contratando servicios de terceros;
- RT017 Se deben usar espaciadores *standoff* para asegurar las placas electrónicas;
- RT018 El peso total del *CubeSat* debe ser menor a 1 kg;
- RT019 El diseño estructural debe utilizar el patrón *CubeSat*;
- RT020 La estructura debe tener espacio para alojar los subsistemas en su interior;

- RT021 El *CubeSat* debe tener subsistema de computador de vuelo;
- RT022 El *CubeSat* debe tener subsistema comunicaciones;
- RT023 El *CubeSat* debe tener subsistema potencia;

4.2.3 Requerimientos operacionales

- RO001 Se debe utilizar en un computador con Windows 7 o superior con el (los) *software* necesario(s) para su operación;
- RO002 El encargado del *CubeSat* debe conocer su modo de operación al realizar pruebas;
- RO003 EL funcionamiento del *CubeSat* debe ser presentado de manera práctica y entendible;

4.3 PLATAFORMA DEL CUBESAT

Un satélite convencional, como se puede detallar en el Capítulo 3 (Marco Teórico). Cuenta con una serie de subsistemas que al trabajar en conjunto logran el funcionamiento del mismo, de igual manera el *CubeSat* cuenta con: subsistema de computador de vuelo [CPU], subsistema de potencia, subsistema de comunicaciones y carga útil.

4.4 SUBSISTEMA DE COMPUTADOR DE VUELO [CPU]

El computador de vuelo es parte fundamental del *CubeSat* ya que este recibe y almacena las tareas que se programan en él, interactuando con cada uno de los subsistemas logrando la funcionabilidad del *CubeSat*, consta de un circuito integrado que como ya se mencionó en el Capítulo 3 (Marco Teórico), almacena las instrucciones que debe realizar el *CubeSat* con los datos que se registren. Debe contar con al menos seis (6) entradas analógicas para tomar las señales de los sensores y queden algunas disponibles por si se llegan a necesitar.

4.5 SUBSISTEMA DE POTENCIA

Todos los sistemas electrónicos constan de una fuente eléctrica de alimentación que proporciona la energía suficiente para su funcionamiento. Una falla en este subsistema puede generar el fracaso o la terminación temprana de una misión como el caso del *Sputnik I* o el +AAU mencionados en el Capítulo 3 (Marco Teórico). El Sistema de potencia se diseña para ser auto sostenible durante el tiempo que dure en misión, almacenando la energía tomada por los paneles solares en las baterías, y luego este voltaje es entregado a todo el satélite. El *CubeSat* recarga sus baterías al conectarlas directamente a 110 VAC mediante una fuente de voltaje DC y paneles solares.

4.6 SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES

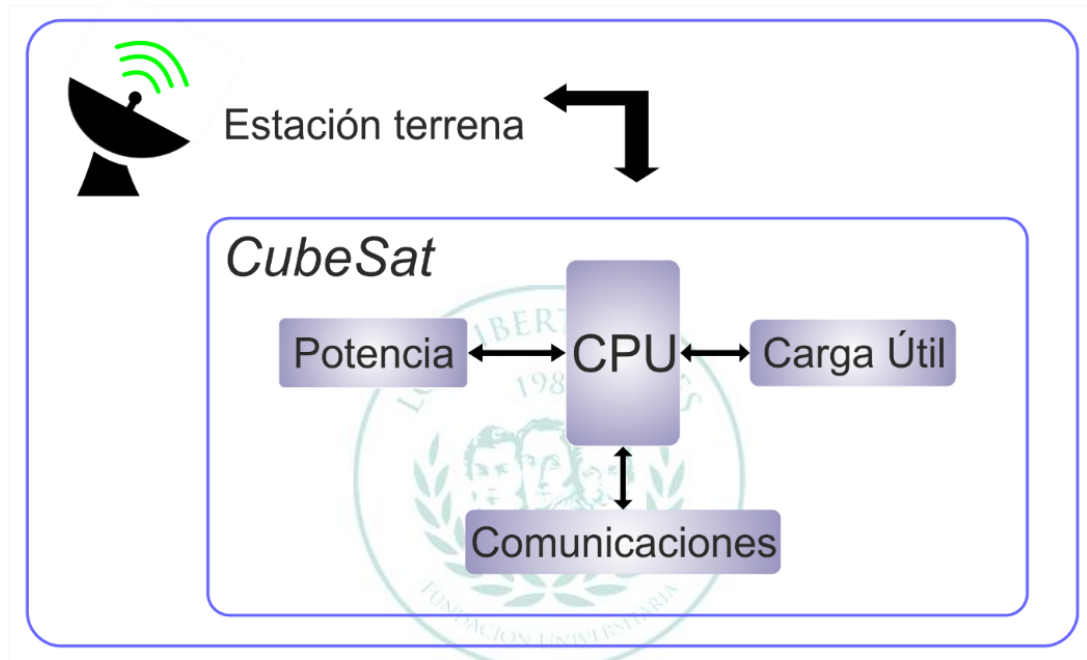
En los sistemas de adquisición de datos, un punto importante es la manera de transmitir las señales que son recolectadas; entre los modos de transmisión de datos más comunes esta la comunicación por medios confinados o cableados y la comunicación inalámbrica. Para el *CubeSat*, este subsistema es quien establece un canal de comunicación inalámbrica entre la estación terrena y el *CubeSat*, compuesto por un circuito emisor instalado en el *CubeSat* y un receptor conectado a la estación terrena donde se visualizaran los datos registrados por los sensores.

4.7 CARGA ÚTIL

La carga útil de un satélite son los instrumentos que necesita para realizar su trabajo, esto depende de su función, un satélite de comunicaciones contiene grandes antenas para transmitir señales de televisión o de telefonía; en el caso de los usados en meteorología, entre sus equipos hay cámaras para capturar imágenes de formaciones de nubes. En el subsistema de carga útil se instalaran los sensores de los cuales el subsistema de computador de vuelo

tomara los datos para enviarlos a la estación terrena por medio de los módulos inalámbricos (ver Diagrama 3).

Diagrama 3. Diagrama del *CubeSat*



En el Diagrama 3 se observa la interacción de todos los subsistemas y la carga útil del *CubeSat*

Fuente: Elaboración Propia

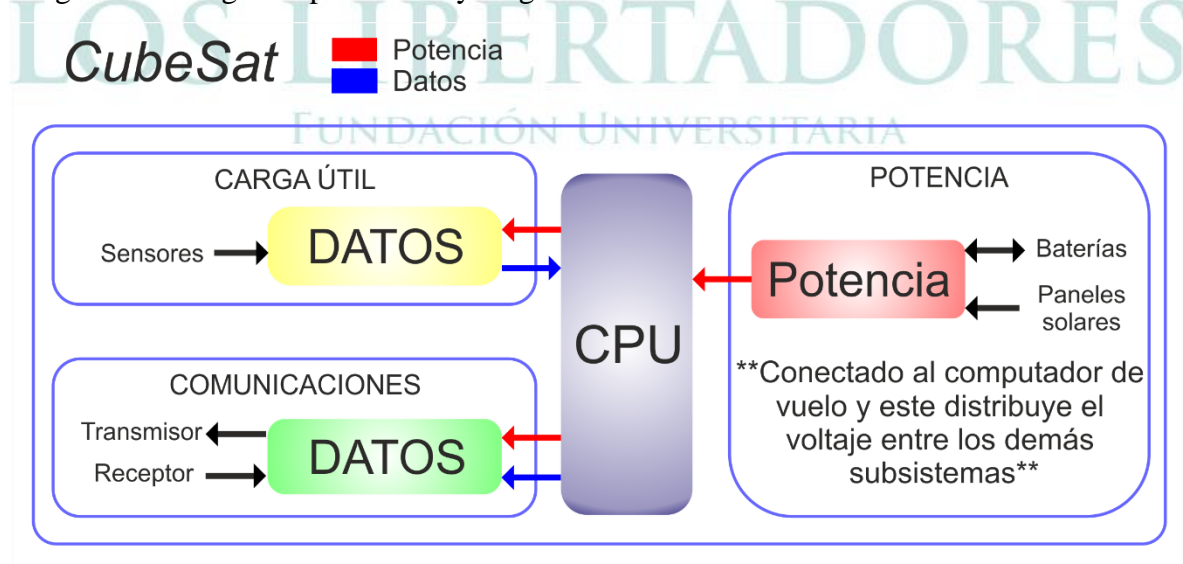
5. PROCESO DE DESARROLLO DE UN CUBESAT DE BAJO COSTO

Como se mencionó en el Capítulo 3 (Marco Teórico), en el diseño preliminar se realizan el, o los prototipos para la realización de las pruebas. Basándose en los requerimientos, dando prioridad a la búsqueda de elementos electrónicos económicos y comunes de adquirir, entre ellos la plataforma de programación y sensores compatibles; por otra parte los elementos estructurales deben permitir que se realicen tareas manuales de corte, lijado, perforado, instalación de circuitos electrónicos y sus correspondientes elementos de sujeción.

5.1 CONCEPCIÓN DEL DISEÑO

En el inicio de la implementación de un proyecto se busca la mejor manera de dar cumplimiento a los requerimientos planteados en la fase de diseño conceptual. Con base a estos requerimientos se establece el desarrollo de un modelo de ingeniería. De tal manera, el *CubeSat* cuenta con los subsistemas de: subsistema computador de vuelo, subsistema potencia, subsistema comunicaciones y carga útil (ver Diagrama 4).

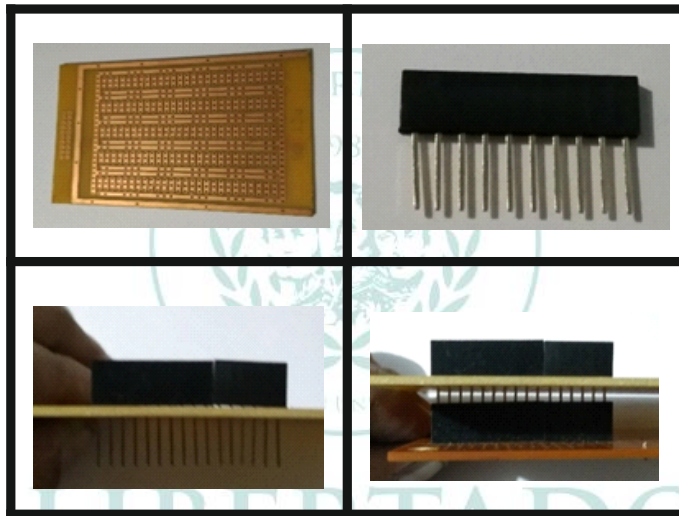
Diagrama 4. Diagrama plataforma y carga útil



Fuente: Elaboración Propia

Cada uno de los subsistemas está instalado en baquelitas universales [cumplimiento a RT012] que se conectan entre sí por medio de un bus de datos [cumplimiento a RT013] (ver Imagen 12). De esta manera se evita el exceso de cables y poder desarmar el *CubeSat* en cada uno de sus subsistemas sin la necesidad de deshacer alguna de sus soldaduras o cortar algún cable al querer hacer cambio de alguna de las tarjetas, ya sea por daño, modificación, actualización o mejora [cumplimiento a RT008].

Imagen 12. Bus de datos [cumplimiento a RT015]



Fuente: Elaboración Propia

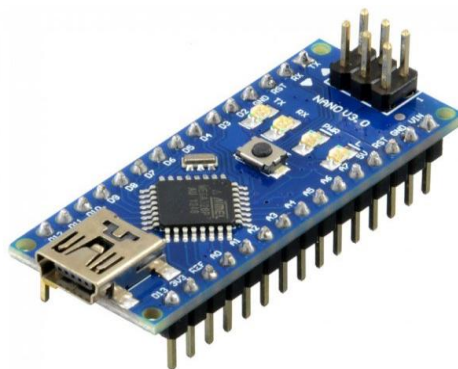
5.2 COMPUTADOR DE VUELO

Como se desarrolló en el Capítulo 3 (Marco Teórico), el computador de vuelo está compuesto principalmente por un microcontrolador que almacena la programación con el ciclo de funcionamiento del *CubeSat*. La plataforma Arduino, es ampliamente usada para el desarrollo de sistemas embebidos⁵⁵ al ser de muy bajo costo y tener un *software* propio y libre para su programación [cumplimiento a RT001/RT002/RT005/RT006]; por estas

⁵⁵ GODSE, A.P, MULANI, A.O, Embedded Systems. Buenos Aires: Humanitas, 2009 cap. I

características, así como su tamaño y peso se adquiere una del tipo Nano con ATmega328.⁵⁶
En la Imagen 13 se observa al Arduino Nano

Imagen 13. Arduino Nano



Fuente. Imagen. Disponible en <https://core-electronics.com.au/nano-v3-0-board-arduino-nano-v3-0-compatible.html>. Recuperado el 23 de Mayo 2018

En la Tabla 3 se pueden observar los pines utilizados del Arduino Nano.

Tabla 3. Pines Utilizados

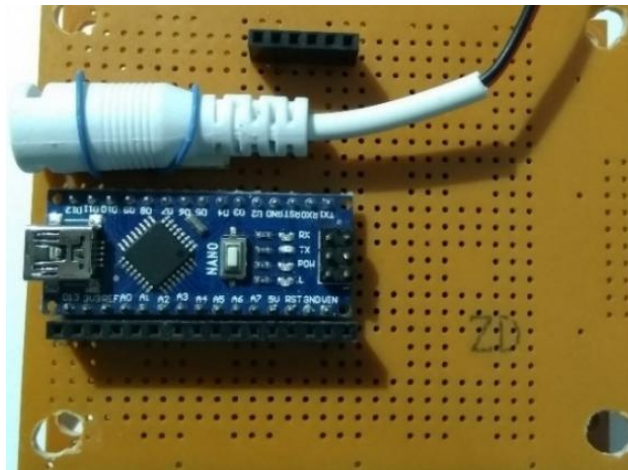
PIN/CATEGORIA	NOMBRE	DETALLES
Potencia	Vin, GND, 3.3V, 5V	Vin: entrada de voltaje (6-12VDC).
		5V: salida regulada 5VDC
		3.3V: salida regulada 3.3VDC - 50mA max
		GND: pin de tierra
Pines analógicos	A0 - A7	Lectura de voltaje entre 0VDC y 5VDC
Comunicación serial	Tx, Rx	Envío y recepción de datos por puerto serial

Fuente: Elaboración Propia

⁵⁶ BARRETT. F. Steven. Arduino Microcontroller Processing for Everyone!, Part 1. Morgan & Claypool Publishers, 2010, p93

El Arduino Nano cuenta con dos salidas reguladas [cumplimiento a RT003], una de 5 VDC y otra de 3.3 VDC; de estas salidas se toma la alimentación para los subsistemas de comunicaciones y carga útil. En la Imagen 14 se observa la instalación del Arduino Nano en baquelita.

Imagen 14. Montaje en baquelita Arduino Nano y conector de carga de baterías



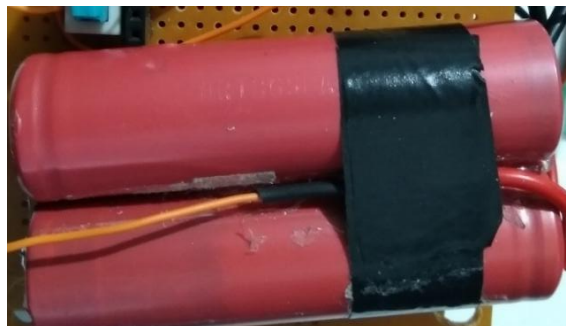
Fuente: Elaboración Propia

5.3 SUBSISTEMA DE POTENCIA

Para el funcionamiento de un satélite es necesario una fuente de alimentación que mantenga encendidos los dispositivos electrónicos cuando se requieran, este debe suministrar energía a todos los subsistemas del *CubeSat*, El subsistema de potencia se conecta directamente al Arduino quien distribuye el voltaje a la plataforma y carga útil, está compuesto por dos baterías de litio recargables de 3.7 VDC y 1200 mA conectadas en serie para un valor total de 7.4 VDC, el diseño del circuito electrónico permite recargar las baterías conectándolas directamente a la red eléctrica por medio de un cargador de 6.5 VDC y 500 mA [cumplimiento a RF001].

En la Imagen 15 se observan las baterías usadas en el proyecto.

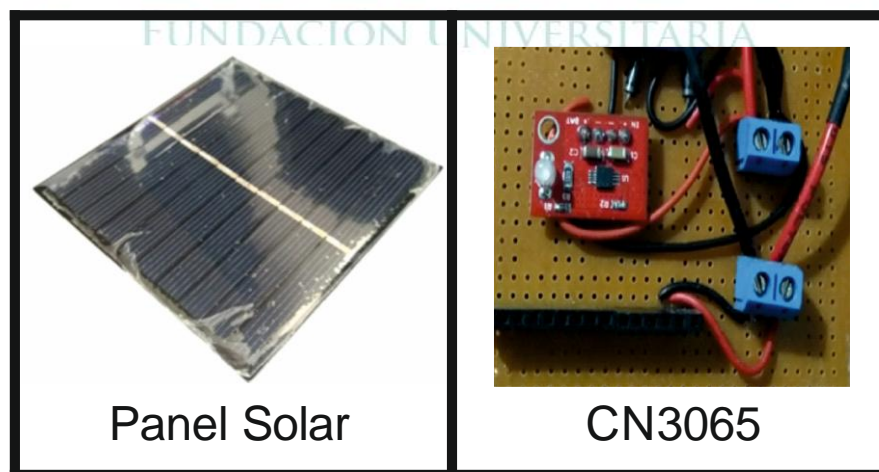
Imagen 15. Baterías



Fuente: Elaboración Propia

El sistema también permite cargar las baterías al mismo tiempo o independientemente de si está conectado a 110 VAC; esto por medio de dos paneles solares de 8 cm x 8 cm conectados en serie que suman un voltaje de ± 9 VDC y una corriente máxima de 165 mA; este voltaje pasa primero por un módulo de carga CN3065 (ver Imagen 16), quien regula el voltaje de entrada de las baterías [cumplimiento a RF002].

Imagen 16. Panel solar, CN3065 y borneras [cumplimiento a RT014]

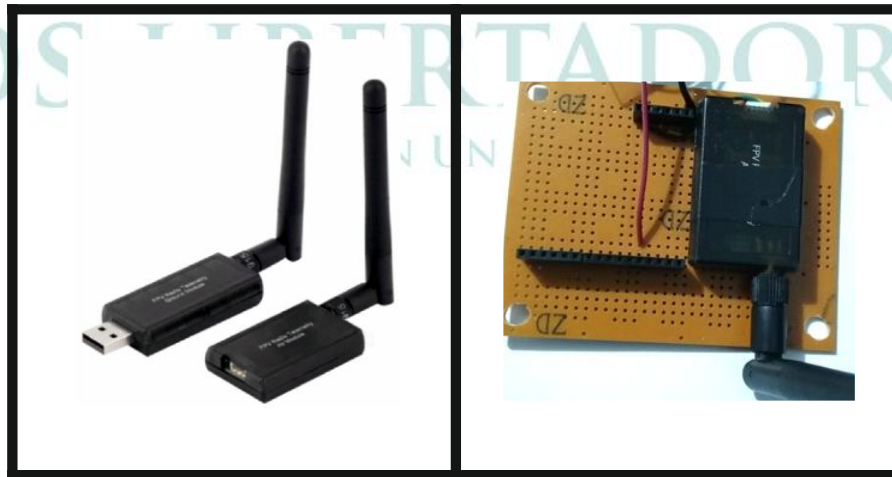


En la Imagen 16 se encuentra: el modelo de panel solar utilizado y a su derecha de color rojo el dispositivo CN3065. Fuente: Elaboración Propia

5.4 SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones es quien permite conocer el estado del funcionamiento del *CubeSat* al recibir correctamente los datos tomados de los sensores [cumplimiento a RF005]. Inicialmente se adquirirían los módulos Xbee SC2 que cuentan con la interfaz de programación [XCTU]. Una de sus ventajas es el direccionamiento de los módulos estableciendo una comunicación punto a punto, pero su costo hizo que se pensara en otra alternativa, partiendo de esto, la comunicación inalámbrica del *CubeSat* se logra con los módulos para telemetría 3DR, usados comúnmente en aeromodelismo. La frecuencia que usa para transmisión de datos es de 433MHz, como desventaja en su funcionamiento estos pueden sufrir de algún tipo de interferencia en su señal, al usar este tipo de comunicación; los módulos 3DR tienen alcance de transmisión de hasta 1 kilómetro con línea de vista, su módulo de vuelo y su módulo de tierra son muy livianos y cuentan con su propia antena; por estas razones, su bajo costo y su compatibilidad para la integración con el sistema es el que se utilizó para el *CubeSat*; en la Imagen 17 se muestra el subsistema de comunicaciones.

Imagen 17. Subsistema de comunicaciones

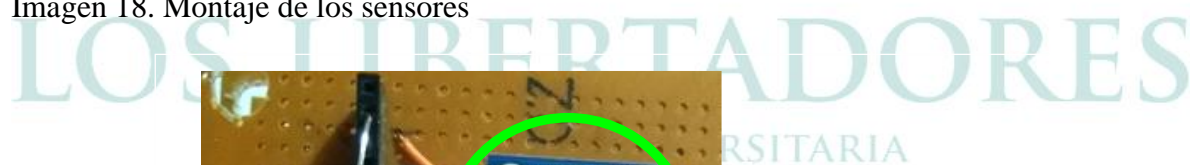


En la Imagen 17, los módulos 3DR y a su derecha el módulo de vuelo instalado en el *CubeSat*. Fuente. Gráfica. Disponible en <https://www.fabtolab.com/radio-telemetry-apm> recuperada el 11 de junio de 2018

global del *CubeSat*; dado que la configuración de esta composición se complicaría; se optó por utilizar el satélite KL335 para el módulo de misión [RT007] y el envío al lanzamiento a RT007] envían la información al módulo de lanzamiento a RF004]. En la Imagen 1 se muestra la estructura general del sistema.

- LM35
- ADXL335

Imagen 18. Montaje de los sensores

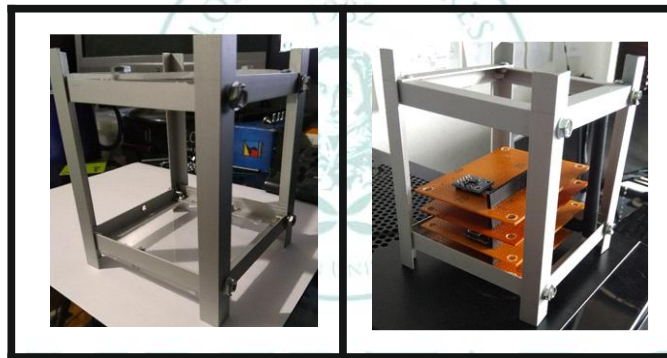


Fuente: Elaboración Propia

5.6 SUBSISTEMA ESTRUCTURAL

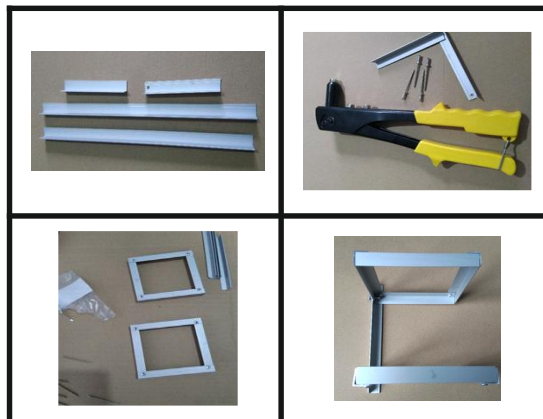
La realización de un *CubeSat* de 1U (ver Imagen 19), indica que el tamaño de los subsistemas está limitado por las dimensiones de la estructura, que además de alojar todos los subsistemas en su interior es quien principalmente da la forma de cubo al proyecto. Al inicio, se emplearía un diseño en *SoliEdge* para luego reproducirlo en una impresora 3D, pero esto incrementaría los costos de fabricación, e invertir más tiempo en la parte de diseño. En la búsqueda de diferentes diseños de estructuras, se termina optando por el uso de perfiles de aluminio en “L” para su construcción [cumplimiento a RT009] (ver Imagen 20).

Imagen 19. Estructura del *CubeSat* [cumplimiento a RT020]



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 20. Perfiles de aluminio en L



Fuente: Elaboración Propia

Para trabajar con este tipo de materiales no se necesita herramienta especializada, lo que permitió que en muy poco tiempo se realizara la estructura del *CubeSat* [cumplimiento a RT019].

5.7 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE SUJECIÓN

El buen funcionamiento de la estructura mecánica de un proyecto no solo está dada por los materiales empleados, sino por los elementos que se usan para el ensamble, estos son los que dan rigidez y buena presentación del *CubeSat*. Los elementos de sujeción, fueron seleccionados para que se puedan desarmar en caso de requerirse; finalmente se usaron 16 tornillos hexagonales de 3/16 x 1/2 [cumplimiento a RT011] (ver Imagen 21) para asegurar la estructura, los acrílicos superior e inferior y los que sujetan los paneles solares en dos de sus caras laterales [cumplimiento a RT010].

Imagen 21. Tornillos hexagonales de 3/16 x 1/2

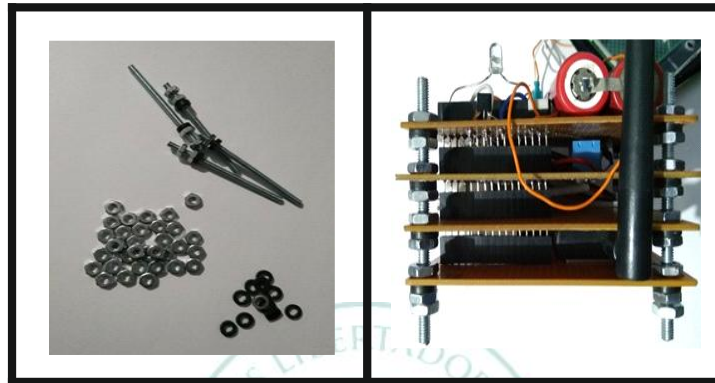


Fuente: Elaboración Propia

Las placas electrónicas al estar conectadas por un bus de datos, requieren de un elemento que las sujete para evitar que haya un mal contacto o que alguna de las placas se suelte, para ese

fin se usaron cuatro (4) varillas roscadas de 5/32" y 40 tuercas hexagonales de 5/32" [cumplimiento a RT017] (ve Imagen 22).

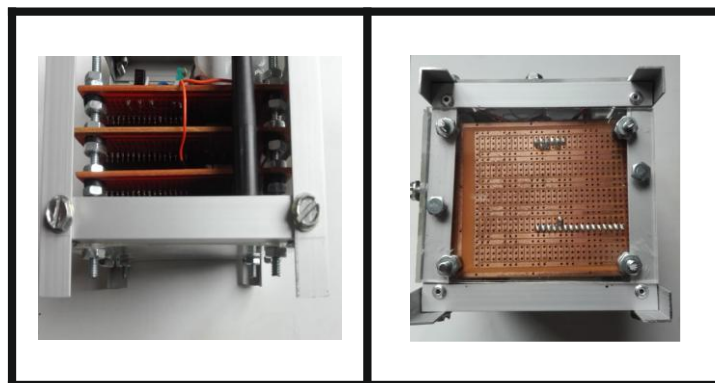
Imagen 22. Postes de sujeción de placas electrónicas



Fuente: Elaboración Propia

La modularidad con la que fue diseñado el *CubeSat* permite que las placas puedan ser cambiadas de lugar, o ser intercambiadas por unas nuevas; la estructura está compuesta por seis (6) partes móviles; cuatro (4) perfiles de 11.3 mm que son los postes de la estructura y dos (2) tapas cuadradas de 10x10 mm una superior y una inferior en donde se aseguran las placas electrónicas a la estructura como se observa en la Imagen 23.

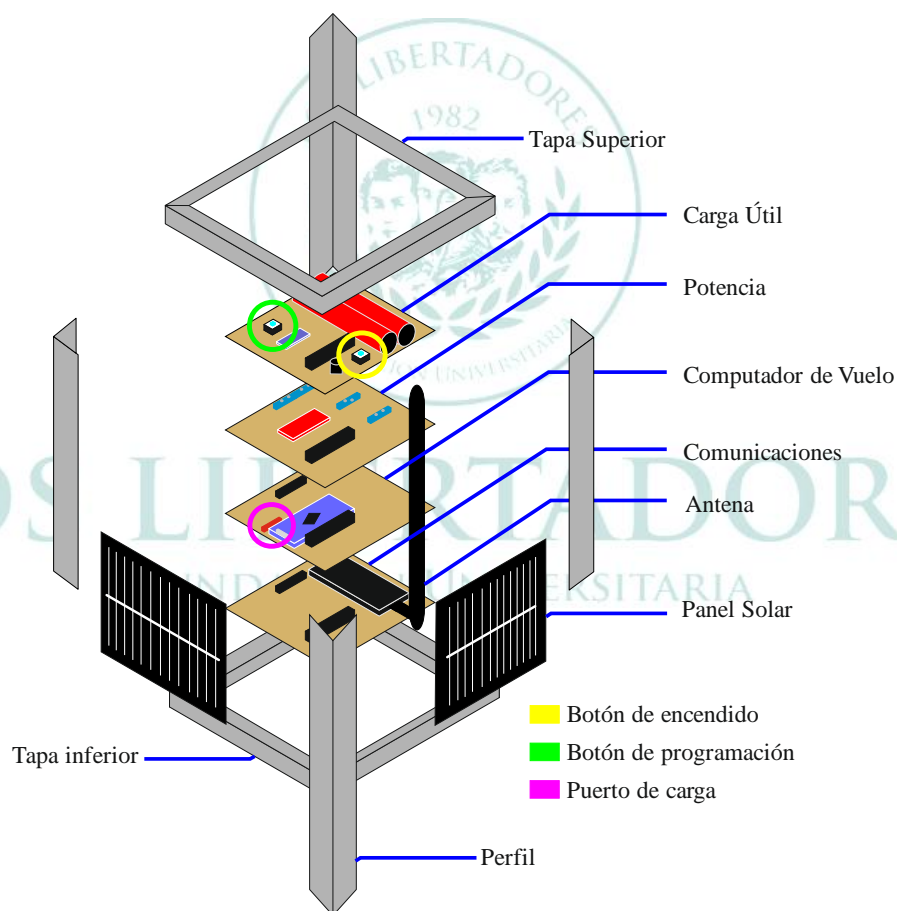
Imagen 23. Sujeción de las placas con la estructura



Fuente: Elaboración Propia

En la Imagen 24 se observa la disposición de todas las piezas que componen al *CubeSat*. En la parte interna, mirando desde abajo hasta arriba las placas electrónicas están instaladas en el orden: subsistema de comunicaciones, subsistema de computador de vuelo y puerto de carga de baterías, subsistema de potencia y carga útil respectivamente; hay que decir que por motivos de espacio las baterías han quedado en la misma placa que la carga útil, pero esto no interfiere en el funcionamiento del *CubeSat*.

Imagen 24. Ensamble del *CubeSat*.



Fuente: Elaboración Propia

En la Imagen 25 se observa la integración de todas las partes del *CubeSat*

Imagen 25. Ensamble del *CubeSat*.



Fuente: Elaboración Propia

La selección de estos materiales para la estructura, junto con los equipos electrónicos da como resultado en el ensamble final del *CubeSat* un peso total de 0.525 kg [Cumplimiento a RT018], como se observa en la Imagen 26.

Imagen 26. Peso total del *CubeSat*



Fuente: Elaboración Propia

5.8 CONSUMO DE CORRIENTE DEL *CUBESAT*

Matemáticamente se comprueba la autonomía o cuánto tiempo podría estar encendido el *CubeSat* con las baterías totalmente cargadas. En la Tabla 4 se encuentra el consumo de corriente de cada uno de los dispositivos electrónicos.

Tabla 4. Consumo de corriente de los dispositivos

DISPOSITIVO	CONSUMO
MODULOS 3DR	100 mAh
ARDUINO	40 mAh
CN3065	0.8 mAh
ADXL335	0.35 mAh
LM35	0.06 mAh
CONSUMO TOTAL	141.21 mAh

Fuente: Elaboración Propia

Al dividir la corriente por hora que entregan las baterías entre la corriente por hora que consume el *CubeSat* como se muestra en la ecuación 1 se obtiene:

Ecuación 1. Consumo de corriente del *CubeSat*

$$\text{Corriente de las baterías} / \text{Consumo total del } \textit{CubeSat} = \text{Autonomía} \quad (1)$$

Entonces:

$$1200 \text{ mAh} / 141.21 \text{ mAh} = 8,4 \text{ horas}$$

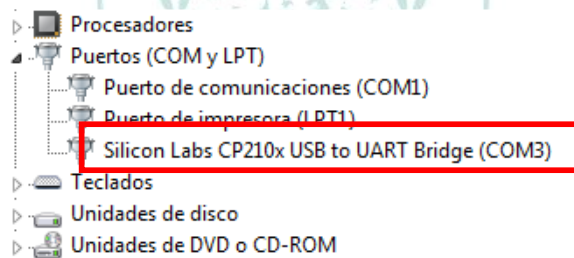
La prueba de autonomía se realizó por 4 horas y 8 minutos. Se suspende para proteger las baterías de daños por descarga.

5.9 ESTACIÓN TERRENA

Este elemento es quien recibe los datos tomados por los sensores, como ya se comentó en este Capítulo numeral 5.4 (subsistema de comunicaciones), la comunicación entre el *CubeSat* y la estación terrena es por medio de módulos inalámbricos. Para efectos prácticos se emplea un computador de mesa con el *software* de programación y visualización de datos [cumplimiento a RF006 / RF007].

El modulo receptor 3DR se conecta vía USB y es reconocido como un puerto COM, enviando la información por puerto serial (ver Imagen 27).

Imagen 27. Administrador de dispositivos Modulo 3DR en puerto serial COM



Fuente: Elaboración Propia

5.9.1 Características del computador

- Procesador AMD X4 965 3.4 GHz
- 6 GB memoria RAM
- Tarjeta de Video 1024 MB AMD Radeon HD 6700 series
- Windows 7 Ultimate 64bits [cumplimiento a RF008/RO001]

5.10 ELEMENTOS DE LA MISIÓN

Una misión espacial, como se mencionó en el Capítulo 3 (Marco Teórico) está conformada por diferentes elementos necesarios para dar cumplimiento a dicha misión. Para el proyecto no se toman en cuenta el elemento lanzador ni el elemento orbital, ya que el *CubeSat* no está

diseñado para ser lanzado y puesto en órbita debido a que antes de esto, el *CubeSat* deberá pasar por pruebas ambientales; estas pruebas están diseñadas para darle aprobación al *CubeSat* de ser lanzado, entre ellas están: test de propiedades físicas, ciclo térmico, Vacío térmico, vibración sinusoidal, vibración aleatoria, choque, entre otros.⁵⁷

De esta manera la misión cuenta con los siguientes elementos.

5.10.1 Aplicación:

Registrar datos de temperatura y actitud usando equipos y sensores de bajo costo

5.10.2 Segmento Espacial (plataforma del satélite):

- Computador de vuelo
- Subsistema de potencia
- Subsistema de comunicaciones
- Carga útil

5.10.3 Segmento Espacial (carga útil del satélite):

Segmento Misión: consiste en el personal y los equipos para realizar la operación de la misión.

- Prototipo *CubeSat*
- Estación terrena

5.10.4 Arquitectura de control, comando y comunicaciones:

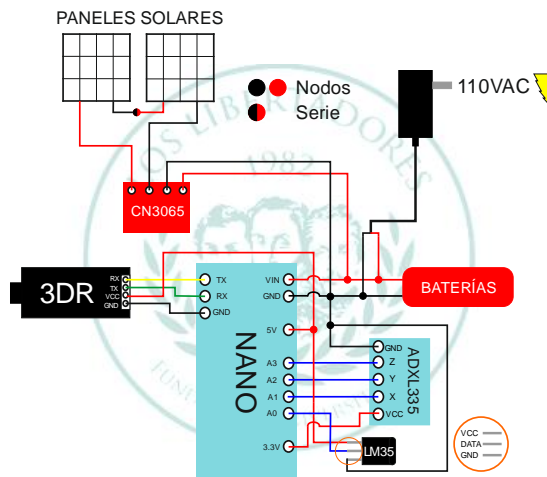
- Arduino Nano
- Módulos de Radiofrecuencia 3DR

⁵⁷ ENDUROSAT space qualification-preparing the satellites for tough missions [En línea]. Disponible en <https://www.endurosat.com/space-qualification/>

5.11 ANÁLISIS FUNCIONAL

Como función, el *CubeSat* realiza la toma de datos de temperatura y actitud para ser enviados a la estación terrena de manera inalámbrica, para que esto ocurra el subsistema de computador de vuelo está programado para enviar todos los registros tomados por el subsistema de carga útil. En el Diagrama 5 se observa el circuito eléctrico del *CubeSat*.

Diagrama 5. Circuito eléctrico de conexiones y componentes.



En el Diagrama 5 se observa el circuito de conexiones eléctricas del *CubeSat*

Fuente: Elaboración Propia

Al encender el *CubeSat* el Arduino que hace las veces de conversor análogo digital [ADC], empieza a recibir datos de los sensores de temperatura y actitud como una señal de voltaje para ser codificada en un código binario. El Arduino define un valor binario entre 0 y 5 V que es el rango en el cual se realizan las mediciones de este conversor [ADC].

El valor de 0 voltios analógico es expresado en digital como B0000000000 (0) y el valor de 5 V analógico es expresado en digital como B1111111111 (1023). Por lo tanto, todo valor analógico intermedio es expresado con un valor entre 0 y 1023, es decir, suma 1 en binario cada 4,883 mV.⁵⁸

⁵⁸ ZUAZO. CALLISAYA José M. trabajo de aplicación prototipo de control de iluminación para la sala de

Luego de la obtención de estos datos el Arduino tiene la instrucción de enviarlos al puerto serial del computador por medio del receptor inalámbrico conectado vía USB, donde son tomados mediante el *software* para ser convertidos de valores [ADC] a valores de temperatura y de grados.

5.12 SOFTWARE E INSTRUMENTACIÓN EMPLEADOS

Al ser Arduino una de las plataformas de desarrollo más populares, ha llevado a que empresas como *MathWorks* y *National Instruments* incluyan librerías compatibles con esta plataforma; de igual manera el mismo Arduino cuenta con su propia interface de programación conocida como [IDE] *Integrated Development Environment* [cumplimiento a RF009/RT004], un entorno de programación basado en C++ que incluye sus propias librerías y ejemplos para que el proceso resulte muy didáctico.

Este trabajo está desarrollado con los programas [IDE] y MATLAB [RF010]. Al inicio del proyecto se trabajó con la librería desarrollada por *MathWorks* para Arduino, los resultados fueron satisfactorios al reconocer las líneas de código necesarias para poder visualizar los datos tomados por los sensores, esto hubo que cambiarlo ya que el Arduino estaba conectado al computador por medio de cable USB y el proyecto exigía que la comunicación fuera inalámbrica; aquí, la librería no ofrecía mucha ayuda ya que al momento de realizar conexión con el microcontrolador esta no se establecía. Después de muchos intentos sin resultado en primer momento se descartó el programa MATLAB al no encontrar la forma de conectar el Arduino con el *software* de manera inalámbrica; se opta por usar el programa *LabView* de la *National Instruments* y los resultados tampoco fueron favorables al no lograr la comunicación inalámbrica.

La búsqueda de una solución comenzó por encontrar la forma de lograr que el Arduino inicialmente enviara datos de manera inalámbrica al monitor serial de la interface [IDE] y después de esto, encontrar la manera de que otro programa tomara estos datos y los presentara.

En [IDE], El comando `analogRead(A0)` hace una lectura en el pin analógico 0 del Arduino, para esto es necesario definir una variable donde este valor sea guardado.

```
out= analogRead(A0);
```

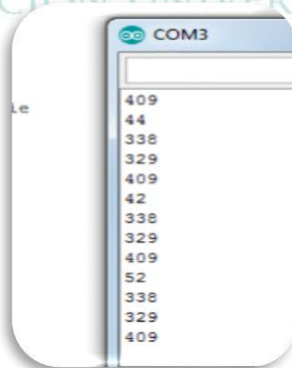
Con el comando `Serial.print` se envía el valor almacenado en dicha variable al puerto serial.

```
Serial.println(out1);
```

El “`ln`” seguido del comando `Serial.print` mostrara el valor tomado en una línea nueva.

Los valores que se están tomando en total son cuatro, uno de temperatura y tres del acelerómetro correspondientes al movimiento en X, Y y Z. De esta manera, el Arduino toma los valores en los puertos análogos A0, A1, A2 y A3 declarándolos como variables enteras y guardándolos en `out1`, `out2`, `out3` y `out4` respectivamente (ver anexo A), luego de esto se envía el dato al puerto serial (ver Imagen 28).

Imagen 28. Recepción de datos por puerto serial COM3



En la Imagen se muestra el monitor serial del software de Arduino, los datos de dos (2) cifras: 44, 42 y 52 son lecturas del sensor de temperatura; los datos de tres (3) cifras corresponden al acelerómetro: 338 para X, 329 para Y y 409 para Z. Fuente: Elaboración Propia

El comando `Serial.begin()` para Arduino define la velocidad de transmisión a 57600 Baudios.

Los datos que se encuentran en el buffer del computador, ya pueden ser tomados por MATLAB, iniciando la comunicación serial

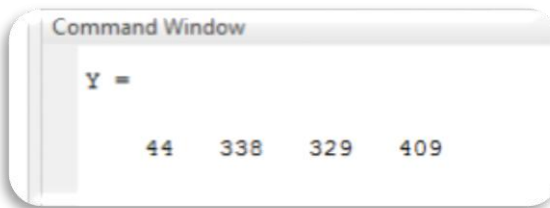
```
delete(instrfind({'port'},{'COM3'}));  
s=serial('COM3'); puerto y se crea el COM3  
s.BaudRate=57600;  
fopen(s);
```

Inicia cerrando el puerto serial y borrando todos los procesos que se encuentren en él, se declara que se usara el puerto serial COM3 nombrándolo con la variable “s” y se establece una velocidad de transmisión de 57600 al igual que en el código del Arduino y finalmente se abre el puerto.

```
a=fscanf(s);  
A(k)=str2double(a);
```

El comando `fscanf()`; toma la información que se encuentre en el puerto serial y guarda cada uno de los valores en las variables “a, b, c y d”, luego de esto es convertida con `str2double()` a una variable tipo double y guardada en las variables A, B, C y D (ver Anexo B) para poder ser trabajadas con MATLAB (ver Imagen 29).

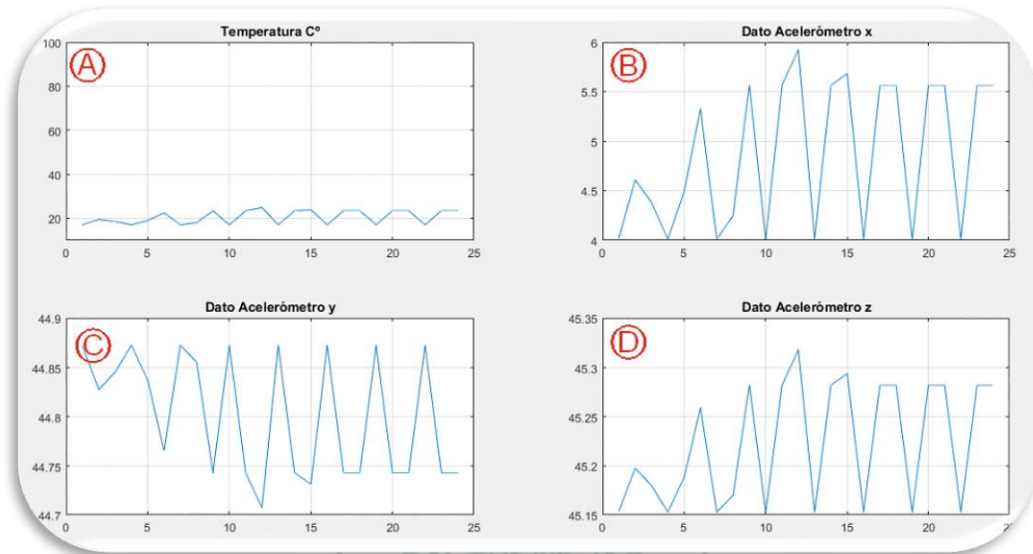
Imagen 29. Recepción de datos por la interfaz de MATLAB



En la Imagen se muestra la recepción de datos en el *Command Window* del *software* MATLAB, los datos de dos (2) cifras: (44) son lecturas del sensor de temperatura; los datos de tres (3) cifras corresponden al acelerómetro: 338 para X, 329 para Y y 409 para Z. Fuente: Elaboración Propia.

Con los datos obtenidos se realiza la gráfica propuesta para temperatura y los datos del acelerómetro en los tres ejes (ver Imagen 30).

Imagen 30. Graficas de los datos obtenidos en MATLAB



En la Imagen se observan la graficas que se realizan con los datos tomados de los sensores, Grafica A: temperatura, Grafica B: dato del acelerómetro en X, Grafica C: dato del acelerómetro en Y y Grafica D: dato del acelerómetro en Z. Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos por el Arduino, por si solos no dan un valor entendible a lo que se quiere medir; el dato que se toma es llamado valor ADC y debe ser ingresado en la Ecuación 2 para obtener su valor.

Para el sensor de temperatura LM35

Ecuación 2. Temperatura

$$\text{Temperatura} = \text{ValorADC} * 5 * 100 / 1024 \quad (2)$$

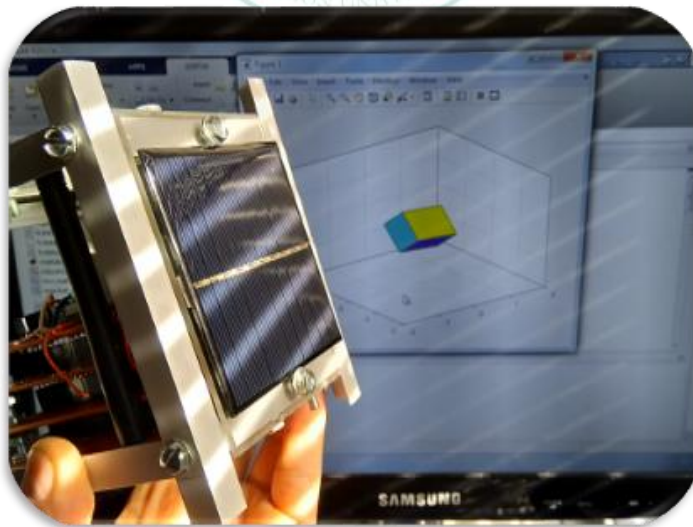
Para el acelerómetro ADXL335 el voltaje de referencia [Vref], es el que se está conectando al sensor (ver ecuación tres (3))

Ecuación 3. Datos del acelerómetro donde $i = X, Y, Z$

$$X_i = (((ADCX_i * Vref) / 1024) - 1.65) / 0.330 \quad (3)$$

El resultado da la posibilidad de ver en tiempo real la posición del *CubeSat*. Este método es utilizado por agencias espaciales para conocer la actitud de un vehículo espacial;⁵⁹ con estos datos los operadores puede hacer corrección de su actitud para transmisiones de datos a un punto específico, o dar un posicionamiento óptimo a los paneles solares y mejorar su exposición a la luz solar, en la Imagen 31 se muestra el *CubeSat* y su interface de visualización de actitud,

Imagen 31. Interfaz del acelerómetro

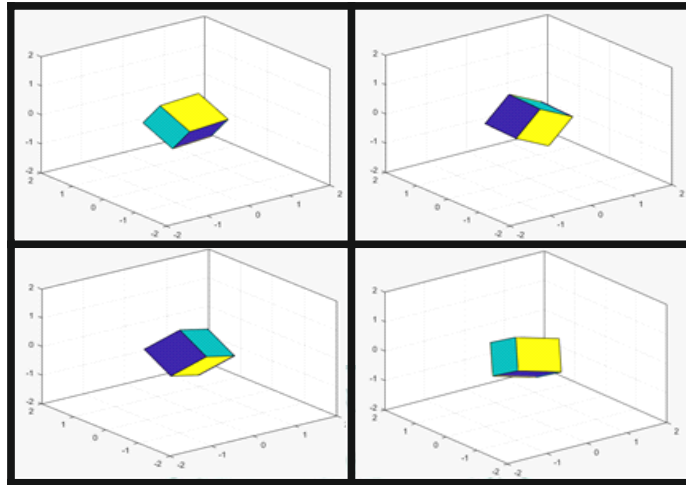


La Imagen se muestra la reacción del cubo en tiempo real con la interface de MATLAB Fuente: Elaboración Propia

⁵⁹ HENDERSON. D. M. Euler Angles Quaternions and Transformation Matrices. NASA. [En línea] Julio 1977 [citado junio 28, 2018]. Disponible en <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770024290.pdf>

En la Imagen 32 se observa la interfaz de visualización.

Imagen 32. Interfaz acelerómetro 2



La Imagen muestra la interface de visualización de actitud y el *CubeSat* en diferentes posiciones, estas imágenes son obtenidas moviendo el *CubeSat* en tiempo real. Fuente: Elaboración Propia

5.13 CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS

La aprobación de un diseño preliminar se da a satisfacción del cumplimiento de los objetivos, requerimientos y necesidades, además de superar las pruebas que se le realizan al o los prototipos, esto dando como resultado un lista de especificaciones y como cumplen con los requerimientos planteados; estas listas se pueden verificar en las Tablas 8 y 9 que se encuentran en los Anexos C y D respectivamente.

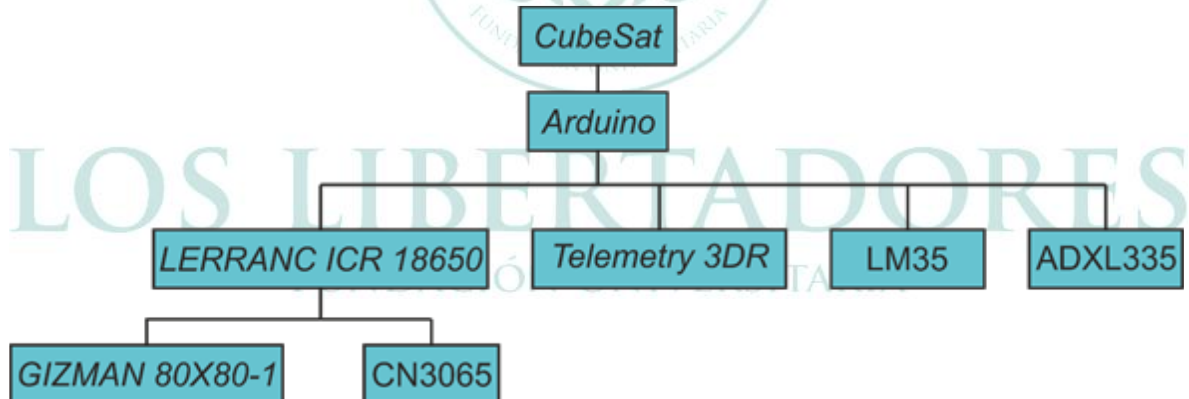
6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL Y PRELIMINAR DE UN CUBESAT DE BAJO COSTO

6.1.1 Arquitectura física

La arquitectura física es el conjunto de elementos diseñados o adquiridos que integrados realizan una función, la forma en la que cada uno interactúa con este es la que le da un funcionamiento óptimo. La integración de diferentes elementos dio como resultado un prototipo funcional que cumple con los requerimientos mencionados en el Capítulo 4 (Diseño conceptual de un *CubeSat* de bajo costo). Es así como se obtiene un sistema simple de adquisición de datos, el diagrama físico del sistema se muestra en el Diagrama 6.

Diagrama 6. Arquitectura física

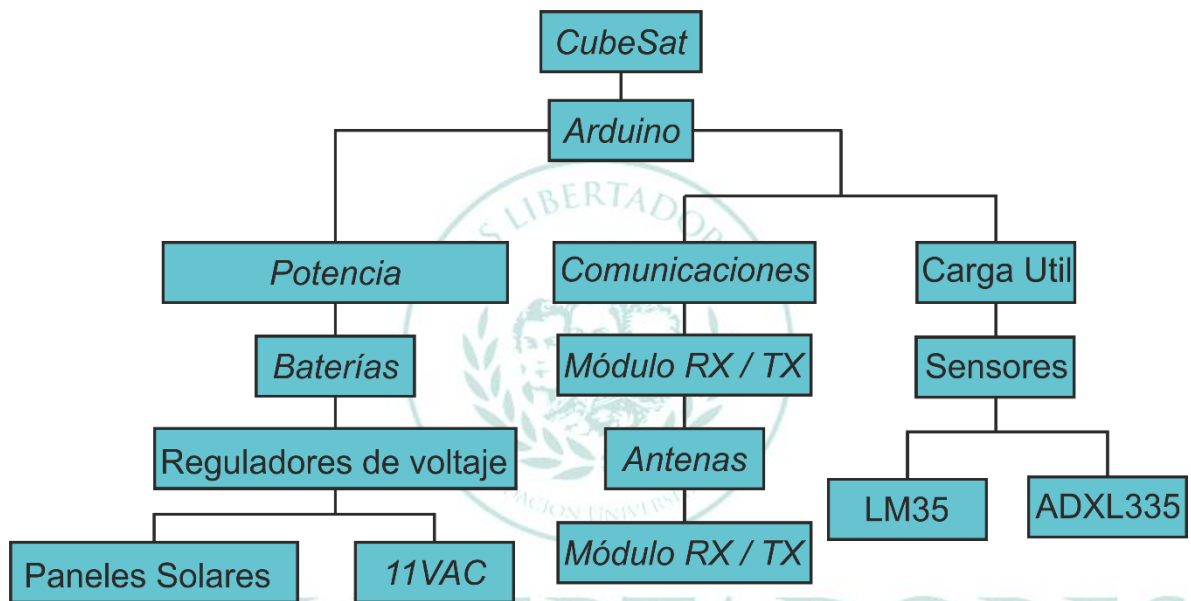


Fuente: Elaboración Propia

6.1.2 Arquitectura funcional

La parte funcional se basa en la interacción de cada uno de los elementos y qué función cumplen dentro del sistema, así como se comentó en el Capítulo 5 (Proceso de desarrollo de un *CubeSat* de bajo costo); en el Diagrama 7 se observa la arquitectura funcional del *CubeSat*.

Diagrama 7. Arquitectura funcional



Fuente: Elaboración Propia

6.1.3 Costos

Teniendo en cuenta los resultados, cabe señalar que la obtención de datos no es la más óptima, y se debe seguir trabajando en el *software*, o implementar un nuevo método de obtención de datos; esto teniendo en cuenta que para el manejo de gráficos dinámicos se requiere un gran consumo de CPU, haciendo que en momentos se haga lento el proceso. Esto resalta la importancia de profundizar en el manejo de programas para la presentación de gráficos como *SimuLink* o *LabView*, generando una necesidad latente de mantener una constante capacitación para el uso de *software* y diseño de sistemas embebidos, mejorando la

presentación y desarrollo de cada proyecto a un nivel más profesional. En la Tabla 5 se encuentra el costo de los equipos y materiales.

Tabla 5. Equipos, materiales y costos

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
4	BAQUELITAS UNIVERSALES 7,5 X 9,5	\$ 2.500	\$ 10.000
4	BORNERAS X2	\$ 400	\$ 1.600
2	BOTONES SWITCH CON MECANISMO NC O NO	\$ 400	\$ 800
4	REGLETA PARA ARDUINO 8 PINES	\$ 800	\$ 3.200
4	REGLETA PARA ARDUINO 6 PINES	\$ 800	\$ 3.200
2	PANELES SOLARES 5V 0.8W	\$ 15.470	\$ 30.940
2	BATERÍAS 3,7VDC 6000MAH	\$ 10.000	\$ 20.000
1	SENSOR DE TEMPERATURA LM35	\$ 3.925	\$ 3.925
1	ACELERÓMETRO ADXL335	\$ 13.090	\$ 13.090
1	MODULO CARGADOR DE BATERÍAS CN3065 PARA PANEL SOLAR	\$ 17.850	\$ 17.850
1	ARDUINO NANO	\$ 18.000	\$ 18.000
1	MÓDULO INALÁMBRICO 3DR 433MHZ	\$ 119.000	\$ 119.000
1	CONECT JACK PLUG DC	\$ 1.250	\$ 1.250
1	PERFIL DE ALUMINIO EN L DE 1CM X 3m	\$ 8.092	\$ 8.092
16	TORNILLOS HEXAGONALES 3/16 X ½	\$ 80	\$ 1.280
1	VARILLA ROSCADA 5/32	\$ 1.500	\$ 1.500
40	TUERCAS HEXAGONALES 5/32	\$ 40	\$ 1.600
4	PLACAS ACRÍLICO 2MM	\$ 2.000	\$ 8.000
TOTAL			\$ 263.327

Fuente: Elaboración Propia

Además de los gastos en materiales, hay que considerar el tiempo que se tomó el desarrollo del *CubeSat*. Se promedia el tiempo trabajado en dos (2) horas diarias durante un (1) año. Cada hora de trabajo se evalúa por un costo de diez mil (\$10000) COP que sumado con el costo de los materiales se obtiene el valor total del proyecto. Como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Costo total del proyecto

730 HORAS DE TRABAJO (APROXIMADAMENTE)	\$ 730.000
MATERIALES Y EQUIPOS	\$ 263.327
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	\$ 993.327 COP

Fuente: Elaboración Propia

6.2 COMPARACION

Las misiones espaciales con *CubeSat* en esencia están encaminadas para lograr el mismo objetivo, la colocación de un artefacto en órbita; esto sin importar la misión por la cual es construido, su metodología de implementación varía en muchos de los casos, algunos optan por adquirir toda la tecnología de empresas que desarrollan sistemas espaciales como *PUMPKIN SPACE* o la Colombiana *SEQUOIA SPACE*. La metodología de desarrollo varía dependiendo de los objetivos y la proyección a futuro de cada proyecto; de esta manera, hay líneas investigación que además de implementar sistemas espaciales también quieren convertirse en desarrolladores, como el proyecto Brasileño AESP-14 que adquiriría sistemas desarrollados por otras empresas con el fin de realizar ingeniería inversa y de aquí poder construir su propia tecnología para que en un futuro cercano pudieran realizar una plataforma completamente hecha en Brasil. En el inicio del desarrollo de misiones *CubeSat* además de lograr cumplir con los objetivos que se plantean, lo más importante es la generación de conocimiento y la experiencia que adquieren las personas involucradas, motivando la confianza para el planteamiento de nuevos proyectos y apoyo de diferentes instituciones de índole pública o privada, ya sea del tipo técnico, económico, logístico o infraestructuras con un ambiente especializado en el desarrollo de tecnologías.

En el caso del proyecto; poder entender la ingeniería de sistemas desde los sensores más básicos para lograr un sistema simple de adquisición de datos, empieza a formar al estudiante para afrontar proyectos de mayor exigencia, dándole un pensamiento crítico sobre las carencias o conocimiento que debe ser reforzado con una constante línea de capacitación y especialización.

En la Tabla 7 se hace una comparación de algunos aspectos del *CubeSat* de bajo costo con el proyecto Libertad 1.⁶⁰

Tabla 7. Comparación con el Libertad 1

	LIBERTAD 1	CUBESAT DE BAJO COSTO
TIPO	Misión experimental	Prototipo experimental
TIEMPO DRLLO	Dos (2) Años	Un (1) Año
COSTO	\$ 450.000.000 COP	\$ 993.327 COP
PERSONAL	8	1

Fuente: Elaboración propia

Esta comparación muestra la cantidad de recursos y tiempo que lleva para poder desarrollar un *CubeSat* con una misión espacial real, aunque los recursos económicos son importantes, el talento humano es pieza fundamental en el desarrollo de cualquier proyecto; de esto radica en la mayoría de los casos el éxito de una misión.

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

⁶⁰ Se cumplen 10 años del lanzamiento del satélite Libertad 1. El Tiempo [en línea] (05 de mayo 2017). Disponible en < <http://www.eltiempo.com/vida/ciencia/libertad-1-diez-anos-del-lanzamiento-del-satelite-colombiano-84636> > y en: http://web.archive.org/web/20070819064134if_/http://www.usa.edu.co/proyecto_espacial/cronograma.html

7. CONCLUSIONES

- Se logró durante el desarrollo del proyecto, realizar el diseño conceptual y preliminar de un prototipo de *CubeSat* de bajo costo que envía mediciones de sensores de temperatura y actitud de manera inalámbrica para ser presentados en una interfaz gráfica como se observa en el Capítulo 5;
- Con el desarrollo de un *CubeSat* se logró explotar al máximo las habilidades del estudiante en aspectos como la búsqueda y aplicación de la información, manejo de *software* de programación, solución de problemas, uso de conocimientos y sobre todo constancia, como se observa en el Capítulo 5;
- Se consigue hacer transferencia de datos de manera inalámbrica y son presentados de manera gráfica en MATLAB como se observa en el Capítulo 5;
- Se sienta las bases para implementar en un menor tiempo futuras investigaciones; logros importantes como la comunicación inalámbrica en tiempo real para la visualización de datos, da un valor agregado al *CubeSat* y puede ser tomado como ejemplo para nuevas investigaciones por parte de estudiantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores que lleguen con ideas nuevas y puedan seguir aportando al desarrollo investigativo de la institución como se observa en el Capítulo 5;
- Se demuestra que con poco presupuesto es posible realizar un proyecto de este tipo, si bien este prototipo está muy lejos de poder participar en una misión espacial; queda para resaltar, que el conocimiento adquirido da una idea de los campos que se deben reforzar para ir avanzando en el desarrollo de una misión espacial real como se observa en el Capítulo 5;

7.2 CONTRIBUCIONES

Los grandes proyectos e investigaciones fueron inspirados en el trabajo y resultados de otras personas, de esta manera la tecnología cada día avanza en pro del desarrollo profesional de los individuos y de la humanidad.

Con este trabajo se quiere resaltar la importancia de fomentar el interés en el desarrollo y construcción de misiones espaciales, no solo de estudiantes y profesionales sino de universidades, empresas, particulares y entidades del estado; que aporten los recursos necesarios para posicionar la investigación espacial entre las tareas más importantes en el país, al implementar una constante línea de mejoramiento en áreas multidisciplinarias que tengan como objetivo aportar y enfocar nuevos conocimientos a la tecnología espacial.

A su vez este proyecto queda como material de estudio para los estudiantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores, quienes serán los encargados de tomarlo como ejemplo o guía para establecer nuevas investigaciones. Para que en un futuro cercano, todos estos esfuerzos logren poner en órbita un *CubeSat* propio bajo el sello Libertador.

7.3 LIMITACIONES

Las limitaciones de un proyecto están definidas y muy ligadas al alcance que se le quiere dar, esto haciendo referencia de hasta qué punto se quiere llegar en una investigación y que factores se tienen en contra para la ejecución de los procesos. Inicialmente la falta de presupuesto llevo a que el *CubeSat* se desarrollara pensando en la optimización de recursos, como la adquisición de dispositivos económicos; cabe concluir que con la compra de sensores de mejor calidad, además de incrementar el presupuesto, se hubiesen logrado mejores resultados; la falta de conocimiento y experiencia en campos como la programación y la transmisión de datos obligo a que el tiempo de desarrollo se prolongara, así como la falta de una guía técnica especificada para el desarrollo llevo a investigar diferentes fuentes e ir

sumando cada método o solución al proyecto, si bien el tiempo de dedicación se ve limitado por diferentes factores, se debe fomentar el aprovechamiento del tiempo en la etapa formativa del estudiante.

7.4 TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

Una misión espacial en Colombia si es posible, al lograr un apoyo económico, y un grupo de trabajo dispuesto a llevar a cabo las exigencias y objetivos que se plantearían, este prototipo se desarrolló con limitación en presupuesto y en personal, así como la inversión en tiempo de investigación, aprendizaje, programación e implementación de pruebas que se necesitaron para llegar a este punto, el haber tenido colaboración de más personas en el desarrollo del proyecto pudo representar un menor tiempo para la finalización y presentación de este trabajo, es por esto que se enfatiza el trabajo en equipo con personas con las que se pueda optimizar el tiempo, aporten ideas y soluciones al desarrollo del proyecto.

Se espera que los resultados logrados con este proyecto sean fuente de inspiración para aplicación de nuevas tesis de grado, no necesariamente en el campo espacial si no en ramas de la ingeniería como la aerodinámica, investigación de materiales, aviónica, telecomunicaciones y afines.

De las cosas que se hubieran podido lograr, es el uso de una nueva programación o *software* que realice el proceso de obtención y presentación de datos de manera más óptima, logrando así un mejoramiento en cada subsistema, también realizar el diseño e impresión de placas electrónicas para cada circuito. Para un futuro se planea la adquisición de equipos y materiales con mejores prestaciones como baterías, sensores, microcontroladores y sistemas de comunicación; logrando estas mejoras es posible visualizar que más adelante se puedan comercializar kits educativos que fomenten el interés en el campo aeroespacial a estudiantes de colegios y universidades.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Página dejada en blanco intencionalmente.

BIBLIOGRAFÍA

CEGARRA, José. Metodología de la investigación científica y tecnológica. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2011, 376 páginas, 9788499690278

FORTESCUE, Peter, STARK John & SWINERD Graham. Spacecraft Systems Engineering. 4ta Edición: Editorial Wiley, 2003, 704 páginas, 9780471619512

LOGSDON, John & LAUNIUS, Roger D. Reconsidering Sputnik: Forty Years Since the Soviet Satellite: Editorial Routledge, 2000, 442 páginas, 9789057026232.

MAINI Anil Kumar & AGRAWAL. Varsha. Satellite Technology Principles and Applications. 3ra Edición. Delhi, India: Editorial John Wiley & Sons, 2014, 848 paginas, 9781118636374.

RUBIO, Alberto Martos. Breve historia de la carrera espacial. Madrid: Ediciones Nowtilus S.L., 2010, 352 paginas, 9788497637664.

SZYMANCZYK, Oscar. Historia de las telecomunicaciones mundiales. 1ra Edición. Buenos Aires: Editorial Dunken, 2013, 312 páginas, 9789870267478.

VELA, Rodolfo Neri. Comunicaciones por satélite. Editorial Thomson, 2003, 544 páginas, 9789706862822

WERTZ, James R. & KIRKPATRICK, Douglas. Space Mission Analysis and Design. 3ra Edición. Editorial Springer Netherlands, 1999, 969 páginas, 9780792359012

A.P.Godse, A.O.Mulani, Embedded Systems [En línea]. Editorial Technical Publications, 2009, 376 páginas, 9788184317138

Universidad Politécnica de Madrid, TelCUBE: Implementación de un Project-Based Learning multidisciplinar para el desarrollo de un picosatélite. [En línea]. 2010 . Disponible en: http://oa.upm.es/8147/1/INVE_MEM_2010_81413.pdf

Heidt Mr. Hank, Prof. PUIG-SUARI Jordi, Prof. MOORE Augustus S., Prof. NAKASUKA Shinichi, Prof. TWIGGS Robert J. *CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation* [En línea]. 2000. Disponible en:

<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2069&context=smallsat>

PORTILLA. José Gregorio. La órbita del satélite Libertad 1. [En línea]. 2012 Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000400002

ANDERSON Chad, BRUNSKILL Chris, GUILLO Corentin, SMALL IS THE NEW BIG. [En línea]. 2014. Disponible en <https://sa.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2016/03/Small-is-the-new-Big.pdf>

ESIONWU Chris Adolphus Jnr. APPLICATION OF *CUBESAT*s. MEngAero/Astro Engineering, Kingston University London [En línea]. Disponible en. https://www.academia.edu/8679320/Applications_of_CubeSats.PDF?auto=download

ESIONWU Chris Adolphus Jnr. Comprehensive List of *CubeSat* Missions. MEngAero/Astro Engineering, Kingston University London [En línea]. Disponible en. https://www.academia.edu/7787703/List_of_CubeSat_Missions.pdf

Murcia-Piñeros J.O, J.G. Portilla: Estudio preliminar de la colocación de un satélite artificial mediante un cohete lanzado desde territorio colombiano [En línea]. 2013. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a02.pdf>

HSIAO. Randy y SCHOLZ. Artur, Open Sourcing *CubeSat* Design. [En línea]. 2015 Disponible en

<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3310&context=smallsat>

SWARTWOUT. Michael, The First One Hundred *CubeSats*: A Statistical Look [En línea]. 2013 Disponible en

<http://web.csulb.edu/~hill/ee400d/Project%20Folder/CubeSat/The%20First%20One%20Hundred%20CubeSats.pdf>

MORENO. Olmo A., MUÑO L.A. z, MORENO Prudenciano, and VARGAS Eduardo E. Cubic Satellites, Vanguard Technology Integration, an Educational Opportunity of Modernization in Mexico [En línea]. 2010. Disponible en

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16318-0_32

CHIN. Alexander y NUGENT Ryan, *CubeSat*: The Pico-Satellite Standard for Research and Education. [En línea]. 2008. Disponible en.

[https://www.researchgate.net/publication/242172999_CubeSat_The_PicoSatellite_Standard_for_Research_and_Education?enrichId=rgreq-](https://www.researchgate.net/publication/242172999_CubeSat_The_PicoSatellite_Standard_for_Research_and_Education?enrichId=rgreq-97707c5ce003b3e8e4a4276d70f66593XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI0MjE3Mjk5OTtBUzoyMDA0MDU5MTgxOTU3MTJAMTjNDc5MTkwMjk3NA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf)

[97707c5ce003b3e8e4a4276d70f66593XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI0MjE3Mjk5OTtBUzoyMDA0MDU5MTgxOTU3MTJAMTjNDc5MTkwMjk3NA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/242172999_CubeSat_The_PicoSatellite_Standard_for_Research_and_Education?enrichId=rgreq-97707c5ce003b3e8e4a4276d70f66593XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI0MjE3Mjk5OTtBUzoyMDA0MDU5MTgxOTU3MTJAMTjNDc5MTkwMjk3NA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf)

CIENCIA UANL. Nuevo León. México. Septiembre, 2016, no. 81. ISSN 2007-1175

KANE. Joseph W, STERNHEIM. Morton M. Física [En línea]. Editorial Reverté, 1989, 795 páginas, 9788429143188.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Página dejada en blanco intencionalmente.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ANEXO A CÓDIGO PARA ARDUINO

```
int out1 = 0;
int out2 = 0;
int out3 = 0;
int out4 = 0;

void setup() {
  // Inicializar puerto serie
  Serial.begin(57600);
}

void loop() {
  // leer pines
  out1 = analogRead(A0);
  out2 = analogRead(A1);
  out3 = analogRead(A2);
  out4 = analogRead(A3);

  // enviar
  Serial.println(out1);
  Serial.println(out2);
  Serial.println(out3);
  Serial.println(out4);

  // esperar
  delay(500);
}
```



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ANEXO B CODIGO PARA MATLAB

GRÁFICAS

```
close all; %Cierra todo lo que matlab tenga abierto
clear all; %limpia todas las variables
clc; %limpiar la pantalla

%INICIAR LA CONECCION CON EL PUERTO SERIAL

%Borra datos que se encuentren previos y vuelve a declarar el puerto y la
%velocidad de transmisión
delete(instrfind({'port'},{'COM3'})); %borrar cualquier puerto serial
abierto
s=serial('COM3'); %declaro variable llamada puerto y se crea el COM3
s.BaudRate=57600; %Establecer velocidad de transmisión
fopen(s);%abre el puerto a utilizar

global k
contador=1;
k=1;
t=0;

while contador<=inf
    contador=contador+1;
    t=t+1;

    %ADQUISICION DE DATOS

    a=fscanf(s);          %toma dato puerto serial del pin A0
    A(k)=str2double(a);   %convierte el valor de string a double del
    dato tomado del pin A0
    b=fscanf(s);          %toma dato puerto serial del pin A1
```

```

B(k)=str2double(b);    %convierte el valor de string a double del dato
tomado del pin A1
c=fscanf(s);           %toma dato puerto serial del pin A2
C(k)=str2double(c);    %convierte el valor de string a double del dato
tomado del pin A2
d=fscanf(s);           %toma dato puerto serial del pin A3
D(k)=str2double(d);    %convierte el valor de string a double del dato
tomado del pin A3

Y=[A B C D]

%TRATAMIENTO DE DATOS TOMADOS

tem(t)=A*5/1024*100;   %temperatura Puerto A0

Rx = (B*1024)/3.3;      %acelerometro dato X puerto A1
x1 = (((Rx*3.3)/1024)-1.65)/0.33;

Ry = (C*1024)/3.3;      %acelerometro dato Y puerto A2
y1 = (((Ry*3.3)/1024)-1.65)/0.33;

Rz = (D*1024)/3.3;      %acelerometro dato Z puerto A3
z1 = (((Rz*3.3)/1024)-1.80)/0.33;

angle_x(t) = atan(x1/(sqrt(y1^2+z1^2)))*180/pi; %angulo de
variacion acelerometro en X
angle_y(t) = atan(y1/(sqrt(x1^2+z1^2)))*180/pi; %angulo de variacion
acelerometro en Y
angle_z(t) = atan((sqrt(x1^2+y1^2)/z1))*180/pi; %angulo de variacion
acelerometro en Z

subplot(2,2,1)
plot(tem)
ylim([10 100])

```



```

title('Temperatura C°')
grid

subplot(2,2,2)
plot(angle_x)
title('Dato Acelerómetro x')
grid

subplot(2,2,3)
plot(angle_y)
title('Dato Acelerómetro y')
grid

subplot(2,2,4)
plot(angle_z)
title('Dato Acelerómetro z')
grid

drawnow

```

end



PROGRAMACION PARA VER LA ACTITUD DEL CUBO

```

close all; %Cierra todo lo que matlab tenga abierto
clear all; %limpia todas las variables
clc; %limpiar la pantalla

```

```
%INICIAR LA CONECCION CON EL PUERTO SERIAL
```

```

%Borra datos que se encuentren previos y vuelve a declarar el puerto y la
%velocidad de transmisión
delete(instrfind({'port'},{'COM3'}));
s=serial('COM3');

```

```
s.BaudRate=57600;
```

```
fopen(s);
```

```
global k
```

```
contador=1;
```

```
k=1;
```

```
% t=0;
```

```
while contador<=inf
```

```
    contador=contador+1;
```

```
%     t=t+1;
```

```
%ADQUISICION DE DATOS=====
```

```
a=fscanf(s);
```

```
A(k)=str2double(a);
```

```
b=fscanf(s);
```

```
B(k)=str2double(b);
```

```
c=fscanf(s);
```

```
C(k)=str2double(c);
```

```
d=fscanf(s);
```

```
D(k)=str2double(d);
```

```
%CREACION DEL CUBO=====
```

```
xc=0; yc=0; zc=0;      % Centro
```

```
alpha=1;               % transparencia
```

```

X = [0 0 0 0 0 1; 1 0 1 1 1 1; 1 0 1 1 1 1; 0 0 0 0 0 1];
Y = [0 0 0 0 1 0; 0 1 0 0 1 1; 0 1 1 1 1 1; 0 0 1 1 1 0];
Z = [0 0 1 0 0 0; 0 0 1 0 0 0; 1 1 1 0 1 1; 1 1 1 0 1 1];

H = [0.7 0.5 0.9 0.9 0.7 0.5];    % color/cara

X = (X-0.5) + xc;
Y = (Y-0.5) + yc;
Z = (Z-0.5) + zc;

V=[reshape(X,1,24); reshape(Y,1,24); reshape(Z,1,24)];

%TRATAMIENTO DE DATOS =====

AdcRx = (B*1024)/3.3;
Rx = ((AdcRx*3.3)/1023)-1.65)/0.33;

AdcRy = (C*1024)/3.3;
Ry = ((AdcRy*3.3)/1023)-1.65)/0.33;

AdcRz = (D*1024)/3.3;
Rz = ((AdcRz*3.3)/1023)-1.65)/0.33;

% R = sqrt((x^2)+(y^2)+(z^2))

% angle_x = 0;
% angle_y = 0;
angle_z = 0;

angle_x = atan(Rx/(sqrt(Ry^2+Rz^2)))*45/pi;
angle_y = atan(Ry/(sqrt(Rx^2+Rz^2)))*45/pi;
% angle_z = atan((sqrt(Rx^2+Ry^2)/Rz))*46/pi;

```

```

d cm = (angle2d cm(angle_y, angle_z, angle_x)); %crea la matriz de
rotacion

VR_filtered=d cm*V;

XR_filtered=reshape(VR_filtered(1,:),4,6);
YR_filtered=reshape(VR_filtered(2,:),4,6);
ZR_filtered=reshape(VR_filtered(3,:),4,6);

fill3(XR_filtered,YR_filtered,ZR_filtered,H,'FaceAlpha',alpha);

xlim([-2 2]);
ylim([-2 2]);
zlim([-2 2]);
grid on
box on
drawnow

end

```



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ANEXO C TABLA DE REQUERIMIENTOS

Tabla 8. Requerimientos

REQUERIMIENTOS FUNCIONALES		
ORIGEN	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
ND001	RF001	El CubeSat debe tener Sistema de baterías recargables;
ND001	RF002	Las baterías deben recargar con paneles solares y 110VAC;
ND001	RF003	Las baterías deben suministrar energía al CubeSat por un mínimo de 3 horas continuas;
ND001	RF004	El CubeSat debe tomar datos de temperatura y actitud;
ND001	RF005	El CubeSat debe enviar los datos inalámbricamente;
ND001	RF006	Una estación terrena debe tomar los datos enviados por el CubeSat;
ND001	RF007	La estación terrena debe usar un software para visualizar los datos tomados;
ND001	RF008	El Software usado para la estación terrena debe ser compatible con Windows 7 o superior;
ND001	RF009	Se debe permitir hacer modificaciones a su programación para diferentes tipos de pruebas;
ND001	RF010	La plataforma de desarrollo debe tener compatibilidad con el lenguaje de programación C++;
REQUERIMIENTOS TÉCNICOS		
ORIGEN	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
ND004	RT001	Utilizar materiales y dispositivos de bajo costo y comunes de adquirir;
RF009	RT002	La plataforma de desarrollo debe tener soporte técnico e información en línea;
RF010	RT003	La plataforma debe contar con salidas de voltaje
RF010	RT004	Usar Software compatible con la plataforma de desarrollo para la visualización de datos;
RF010	RT005	La plataforma debe contar con suficientes entradas análogas para los sensores;
ND004	RT006	La plataforma de desarrollo debe ser de bajo costo así como su peso y tamaño;
RF010	RT007	Los sensores de actitud y temperatura deben ser compatibles con la plataforma de desarrollo;
ND002	RT008	Los subsistemas deben estar en placas electrónicas separadas;
ND003	RT009	Los perfiles de la estructura deben ser de material liviano de 13,2 y 10 cm de longitud;
ND003	RT010	Instalar paneles de acrílico para proteger las caras del cubo;
ND003	RT011	Adquirir elementos de sujeción adecuados para la estructura;
ND002	RT012	Usar placas electrónicas para montaje de circuitos electrónicos;
ND003	RT013	El CubeSat debe ser modular;
ND002	RT014	Usar borneras y conectores aéreos para poder desarmar el CubeSat;
ND002	RT015	Adquirir regletas electrónicas de pines largos para el bus de datos;
ND004	RT016	Emplear fuentes secundarias y paneles de expertos con el fin de evitar costos adicionales
ND002	RT017	Espaciadores standoff para los circuitos electrónicos
ND002	RT018	Peso total menor a 1Kg
ND003	RT019	Estructura cubica rígida de 10cm de arista;
ND003	RT020	La estructura debe tener espacio para alojar los subsistemas;
ND001	RT021	El CubeSat debe tener subsistema de computador de vuelo;
ND001	RT022	El CubeSat debe tener subsistema comunicaciones;
ND001	RT023	El CubeSat debe tener subsistema potencia;
REQUERIMIENTOS OPERACIONALES		
ORIGEN	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
RF008	RO001	Se debe utilizar en un computador con Windows 7 o superior con el (los) software necesario para operación;
ND001	RO002	El encargado del CubeSat debe conocer su modo de operación al realizar pruebas;
ND001	RO003	Su funcionamiento debe ser presentado de manera didáctica y entendible;

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO D TABLA DE ESPECIFICACIONES Y ESPECIFICACIONES

Tabla 9. Cumplimientos y Especificaciones

REQUERIMIENTO	ESPECIFICACIÓN	USO
RF001-RF003-RF023	Baterías LERRANC 3.7 VDC 1200 mA	Conectadas en serie para un valor de 7.4 VDC con el que se alimentan todos los subsistemas
RF002	Panel solar GIZCAM 8X8 cm	2 paneles conectados en serie para un voltaje de ± 9 VDC con el que se recargan las baterías pasando por un módulo CN3065 para regular el voltaje de entrada a las baterías
RF004-RF007	Sensor de temperatura LM35 Acelerómetro ADXL335	Registran los datos y los pasan al Arduino como valores de voltaje
RF005-RT022	Módulos inalámbricos 3DR	Realizan conexión y envían automáticamente los datos que le entrega el Arduino
RF006-RF007-RF008-RF009-RT004-RO001-RO003	Software <i>MATLAB & IDE</i> de Arduino ejecutados en un computador de mesa con Windows 7	con el <i>IDE</i> se programa el Arduino y con el <i>MATLAB</i> se hace la presentación de los datos
RF010-RT002-RT003-RT005-RT006-RO002-RT021	Arduino Nano con ATMEGA328	Plataforma de desarrollo donde se programan las instrucciones de tomar los datos y enviarlos a la estación terrena
RT001	Ver Tabla. Equipos, materiales y costos	lista de materiales y cumplimiento de presupuesto
RT008-RT012-RT013-RT014-RT015-RT017-RT020	Baquelitas universales, Borneras dobles para conexión de cables, regletas con pines de 11 mm, tornillos de sujeción.	Materiales para hacer el bus de datos, borneras para conexiones de claves y tornillos de sujeción; haciendo que el <i>CubeSat</i> sea modular
RT009-RT010-RT011-RT018-RT019	Aluminio en L de 1 cm, paneles de acrílico y tornillos de 3/16"	maritales para la construcción de la estructura
RT016	Información de videos y foros electrónicos	Se recolecta la información necesaria para el proyecto

Fuente: Elaboración Propia



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Página dejada en blanco intencionalmente.